Untersuchungen an Kohlemikrophonen

Von der

Technischen Hochschule zu Breslau

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte

Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Gerhard Kretschmer

aus Breslau

Referent: Prof. Dr. E. Waetzmann

Korreferent: Prof. Dr. H. Happel

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Januar 1936

*87595.

Meinen Eltern in Dankbarkeit

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Sonderdruck aus „Elektrische Nachrichten-Technik“ Band 13, 1936, Heft 5 und 6

Untersuchungen an Kohlemikrophonen.

(Mitteilung aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Breslau.)

Von **E. Waetzmann** und **G. Kretschmer**, Breslau. DK 621.395.613.32

Übersicht.

1. Fragestellung, S. 149. — 2. Gang der Versuche und einige Beispiele, S. 150. — 3. Die Phasenlage von Widerstandsschwankung und Temperaturschwankungen an verschiedenen Stellen des Mikrophons, S. 151. — 4. Erklärung der Widerstandsschwankungen aus der Phasendifferenz zwischen Randtemperatur und Mittentemperatur, S. 152. — 5. Der Einfluß der Randtemperatur, S. 153. — 6. Die Phasenlage der Widerstandsschwankung und der Membranbewegung, S. 154. — 7. Irreversible Widerstandsänderungen, S. 156. — 8. Kohlepulver in anderen Anordnungen, S. 158. 9. Widerstandsschwankungen bei konstanter Spannung, S. 160. — 10. Zusammenfassung, S. 161.

1. Fragestellung.

Der Widerstand von Kohlemikrophonen zeigt in doppelter Beziehung ein sehr auffallendes Verhalten.

Zunächst hat der mittlere Schwingungswiderstand des betönten Mikrophons einen ganz anderen Wert als der Ruhewiderstand. Der Schwingungswiderstand ist größer und wächst innerhalb weiter Grenzen mit der Stärke und mit der Höhe des erregenden Tones. Dieser Effekt, der eine Art Gleichrichterwirkung zur Folge hat und damit die groben nichtlinearen Verzerrungen des Mikrophons verursacht, ist schon 1913 von E. Waetzmann gefunden und in seinen Auswirkungen genau untersucht und beschrieben worden[1]). Abb. 1, die der genannten Arbeit entnommen ist, gibt ein Beispiel. Kurve *a* stellt die Schwingungen einer Mikrophonmembran unter der Einwirkung zweier Primärtöne von etwa 700 und 630 Hz dar. Kurve *b* zeigt, wie die Schwingungsform *a* durch den erwähnten Widerstandseffekt verzerrt, und zwar gleichgerichtet wird; sie stellt die Schwingungen der Membran eines mit dem betönten Mikrophon in Reihe geschalteten Telephons dar. Die Bedeutung des Gleichrichtereffektes für die Klangwiedergabe durch Mikrophone und darüber hinaus für das Verständnis aller nichtlinearen Verzerrungen ist jetzt allgemein bekannt[2]).

Der zweite Effekt betrifft das Gleichstromverhalten, d. h. das Verhalten des vom Speisestrom durchflossenen, aber nicht betönten Mikrophons. Er besteht darin, daß der Widerstand des sich selbst überlassenen Kohlemikrophons unter der Einwirkung eines konstanten (oder wenigstens angenähert konstanten) Gleichstroms ganz regelmäßige Schwankungen

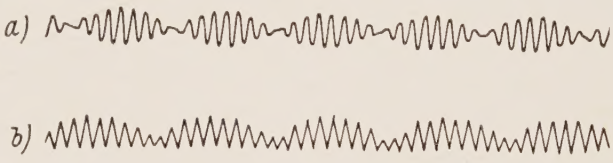

Abb. 1. Gleichrichterwirkung im Kohlemikrophon.

ausführt. Praktisch hat dieser Effekt — im Gegensatz zu dem zuerst genannten Gleichrichtereffekt — keine allzu große Bedeutung. Die Schwingungen bilden sich nur dann gut aus, wenn das Mikrophon längere Zeit hindurch vor Erschütterungen geschützt ist. Bei dem üblichen Fernsprechbetrieb ist das aber nicht der Fall. Trotzdem ist zur Klärung der gesamten Wirkungsweise von Kohlemikrophonen ein genaues Studium dieses Effektes erwünscht. Er ist 1927 im Barkhausenschen Institut von G. Schubert[3]) gefunden worden. Einen wichtigen Erklärungsversuch hat O. Lohaus[4]) gemacht. Er geht von der auch schon von Schubert beobachteten Tatsache aus, daß mit den Widerstandsschwankungen Temperaturschwankungen in dem Kohlepulver verbunden sind, und erkennt als wesentlich für das Auftreten der Schwingungen, daß sich die Mem-

[1]) E. Waetzmann, Ann. d. Phys. **42**, 729, 1913; Phys. ZS. **15**, 638, 1914. Hier ist auch die zweite weniger wichtige Art der nichtlinearen Verzerrungen in Kohlemikrophonen ausführlich dargestellt.

Daneben ist eine Methode zur objektiven Prüfung der Güte der Sprachübertragung mit Hilfe von Schwebungskurven angegeben. Es sei dies erwähnt, weil neuerdings dieser Vorschlag von anderer Seite aufgegriffen worden ist, ohne daß auf die genannten Arbeiten, die schon alles Wesentliche enthalten, Bezug genommen wird.

[2]) Vgl. beispielsweise die Darstellung von Erwin Meyer im Handbuch der Physik, Bd. VIII, S. 519 ff., 1927.

[3]) G. Schubert, ENT **4**, 139, 1927.

[4]) O. Lohaus, ENT **7**, 210, 1930.

bran mit zunehmender Temperatur nach außen ausbaucht (Widerstandszunahme). Die Kohleteilchen sollen dann mit zunehmender Klemmenspannung infolge Fünkchenbildung allmählich zu einem Gerüst verschweißen (Widerstandsabnahme), das bei zurückgehender Membran durch deren Druck wieder zerstört wird (Widerstandszunahme).

Lohaus bemerkt selbst, daß die skizzierte Anschauung den Vorgang nur in groben Zügen wiedergeben dürfte. Auch ist das bisher vorliegende Beobachtungsmaterial noch wenig umfangreich. Wir wollen deshalb im folgenden weiteres Tatsachenmaterial mitteilen und gleichzeitig versuchen, einen Beitrag zur endgültigen Klärung der Frage zu liefern. Hierzu gehört auch die Besprechung einer sonst noch nicht beobachteten Erscheinung, daß nämlich bestimmte Mikrophontypen periodische Widerstandsschwankungen nicht bei konstanter Stromstärke, sondern bei konstanter Spannung geben.

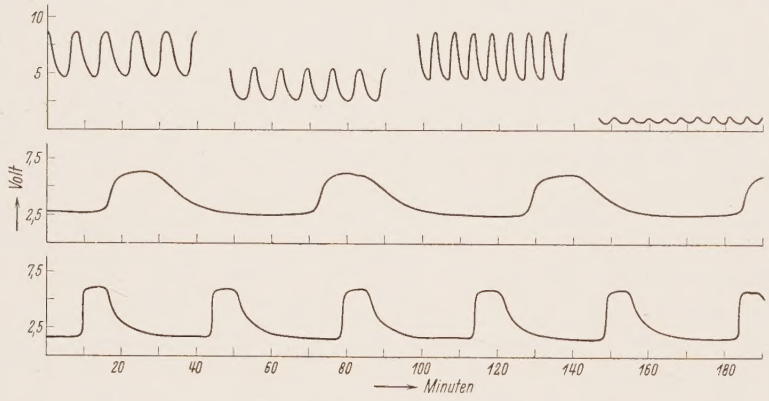

Abb. 2. Widerstandsschwankungen bei verschiedenen Mikrophontypen.

2. Gang der Versuche und einige Beispiele.

Konstanter Speisestromstärke im Mikrophon entspricht praktisch der ZB-Betrieb. Es wurde also eine entsprechende Schaltung benutzt, und ebenso wurden die wichtigsten Beobachtungsreihen an ZB-Mikrophonen ausgeführt. Aber auch das Verhalten einiger OB-Typen sowie besonders zurechtgemachter Mikrophone wurde untersucht. Kleine Schwankungen in der Stromstärke machen nicht viel aus. Bei den Kurven ist in der Regel der Bereich, innerhalb dessen die Stromstärke schwankte, angegeben. Da bei konstanter Stromstärke J die Spannung V direkt ein Maß für den Widerstand R ist, wurden die Schwingungskurven mit einem selbstregistrierenden Voltmeter[5]) aufgenommen. Wir bezeichnen diese Kurven in der Regel als Widerstandskurven. Für genauere Messungen wurde das Registrierinstrument durch ein empfindlicheres Voltmeter mit höherem Widerstand ersetzt, dessen Ausschläge in Abständen von 15 zu 15 sec abgelesen wurden. Alles in allem wurden etwa 200 Kurven registriert, durchschnittlich während etwa 10 Stunden. Gelegentlich wurden die Registrierungen bis über 24 Stunden ausgedehnt; in anderen Fällen schon nach $^1/_2$ Stunde abgebrochen. Das Mikrophon war — in jeder Beziehung möglichst geschützt — in einem Zimmer für sich untergebracht, weil sonst die Beobachter, die die Meßinstrumente für die Temperatur- und Widerstandsmessungen zu bedienen hatten, dauernd Störungen hervorriefen. Auch war es zur Vermeidung von Störungen durch Erschütterungen und Geräusche im allgemeinen noch notwendig, des Nachts zu arbeiten.

In der Hauptsache wurden die Untersuchungen an einem Mikrophonmodell von Mix und Genest ausgeführt. Es war eine ZB-Type mit glatter Membran und der üblichen Anordnung des Kohlepulvers in einer Einzelkammer, die gegenüber der Membranmitte angeordnet ist und seitlich von einem Filzring begrenzt wird; Speisestromstärke etwa 15 bis 40 mA. Soweit bei den Abbildungen nichts anderes angegeben ist, sind die Kurven an dieser Mikrophontype aufgenommen. Daneben standen noch elf andere Typen der Firmen Lorenz, Mix und Genest und Siemens & Halske zur Verfügung, die in mehr oder weniger großem Umfange benutzt wurden.

In Abb. 2 sind einige Proben für den Verlauf der Widerstandsschwankungen zusammengestellt. Zwecks besserer Wiedergabe sind die Registrierkurven (auch in den folgenden Abbildungen) mit Tusche nachgezogen. Die unterste Kurve bezieht sich auf eine OB-Type (Spezialfüllung) von Siemens & Halske, $J = 50-55$ mA; die darüber liegende Kurve auf eine ZB-Type von Siemens & Halske, $J = 48$ bis 52 mA. Die erste Kurve

[5]) Der Apparat wurde uns freundlicherweise von der AEG geliehen, wofür wir auch an dieser Stelle unseren besten Dank sagen.

der obersten Reihe ist an einem anderen Exemplar der gleichen ZB-Type von Siemens aufgenommen, auch bei der gleichen Stromstärke. Übrigens haben wir nur selten beobachtet, daß bei verschiedenen Exemplaren der gleichen Type bei gleichen Stromstärken derart verschiedene Kurven auftraten. Die drei nächsten Kurven der obersten Reihe beziehen sich auf eine ZB-Type (Rotkreuz) mit glatter Membran von Mix und Genest, $J = 30$ bis 34 mA, eine ZB-Type (altes Modell) von Lorenz, $J = 31$ bis 35 mA und auf eine OB-Type (altes Modell) von Lorenz, $J = 50$ mA. Bei den drei letztgenannten Kurven waren die Stromstärken die im Betriebe üblichen; für die Siemensmikrophone waren uns die normalen Betriebsstromstärken nicht bekannt.

3. Die Phasenlage von Widerstandsschwankung und Temperaturschwankungen an verschiedenen Stellen des Mikrophons.

Schubert erwähnt in einer Anmerkung, daß er mit einem in das Mikrophon eingebauten Thermoelement Temperaturschwankungen festgestellt habe, die mit den Widerstandsschwankungen „annähernd gleichzeitig" erfolgen. Anscheinend war das Thermoelement in die Mikrophonfüllung eingebaut. Ebenso hat Lohaus den Temperaturverlauf in der Kohlefüllung gemessen; er fand, daß die Temperatur dem Widerstand nachhinkt.

Wir vermuteten, daß sich zwischen den Temperaturschwankungen an den verschiedenen Stellen eines Mikrophons starke Phasendifferenzen ausbilden, und daß diese Phasendifferenzen von maßgeblichem Einfluß auf das Auftreten und den Verlauf der Widerstandsschwankungen sein dürften. Deshalb wurde bei uns der Temperaturverlauf über das ganze Mikrophon hin untersucht, und zwar mit Hilfe von Wollastondrähten. Vor allem wurden die Temperaturschwankungen in der Mitte und am Rande der Membran nach Größe und gegenseitiger Phase genau gemessen. Daneben wurden zur allgemeinen Orientierung Messungen innerhalb der Kohlefüllung, auf der Membran zwischen Mitte und Rand, am Gehäuse (Metallring, auf dem die Mikrophonmembran aufliegt) und gelegentlich in dem Luftraum des Gehäuses ausgeführt. Über die Technik dieser Messungen wird von G. Kretschmer und A. Ueberschuss in einer gesonderten kleinen Mitteilung berichtet (siehe S. 162). Wir fanden wie Lohaus eine gewisse Phasendifferenz zwischen der Temperatur in der Mitte der Membran und dem Widerstand. Vor allem aber hinkt die Randtemperatur T_R der Mittentemperatur T_M sehr erheblich nach, und diese Phasenverschiebung ist in der Tat für das Verständnis der Widerstandsschwankungen von grundlegender Bedeutung. Sie würde genügen, um das Auftreten von Widerstandsschwankungen verständlich zu machen. Hiermit soll nicht gesagt sein, daß bei den wirklich beobachteten Schwankungen nicht noch andere Faktoren mitwirken.

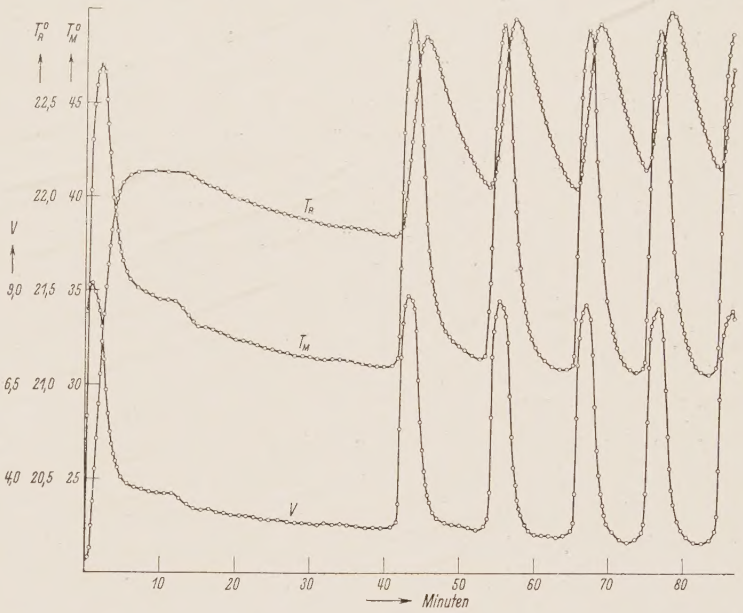

Abb. 3. Phasenlage zwischen Widerstand, Mittentemperatur und Randtemperatur.

Abb. 3 zeigt den typischen Verlauf einer Widerstands- bzw. Spannungskurve (V) vom Moment des Einschaltens des Stromes an bis zur fertigen Ausbildung der regelmäßigen Schwankungen. Ferner zeigt sie die zugehörigen Temperaturkurven für Membranmitte (T_M) und Membranrand (T_R). Wegen der Kleinheit der Abbildung konnte oft nur jeder zweite bis vierte Meßwert in die Kurven eingezeichnet werden.

Nach Einschalten des Stromes steigt der Widerstand zunächst steil an, um aber bald wieder ab-

zufallen, erst steil, dann allmählich. Es dauert in dem vorliegenden Beispiel über 40 Minuten, bevor die periodischen Schwankungen einsetzen. Der erste Anstoß für den Beginn der Schwingungen ist oft ein ganz zufälliger, eine kleine mechanische oder akustische Erschütterung des Mikrophons oder dergl.

Einen ähnlichen Kurvenverlauf wie beim Widerstand sehen wir bei der Mittentemperatur T_M. Die Randtemperatur T_R dagegen braucht ziemlich lange Zeit, bis sie die den Mittentemperaturen entsprechenden Werte angenommen hat. Auffallend ist die Größe der Temperaturschwankungen in der Mitte und ihre Kleinheit am Rande; ebenso auffallend ist die verhältnismäßige Kleinheit der absoluten Temperaturerhöhung am Rande. Die Kleinheit dieser Werte wird verständlich, wenn man die starke Wärmeableitung nach der umgebenden Luft hin bedenkt; ihr starkes Nachhinken gegenüber den T_M-Werten wird verständlich, wenn man bedenkt, daß der die Membran tragende Ring einen verhältnismäßig großen Wärmespeicher darstellt, zumal noch das ganze Gehäuse metallisch mit ihm verbunden ist. Die eigentliche Quelle der Jouleschen Wärme liegt im Kohlepulver bzw. der Membranmitte, da der sehr kleine Widerstand zwischen Mitte und Rand der Membran für den Gesamtwiderstand des Mikrophons kaum in Betracht kommt. Die Erwärmung der Randpartien geschieht also durch Wärmemengen, die von der Mitte zum Rande transportiert werden.

4. Erklärung der Widerstandsschwankungen aus der Phasendifferenz zwischen T_R und T_M.

Mit Erwärmung der Membranmitte baucht sich die Membran aus, und zwar immer nach außen hin, weil vermutlich, wie schon Lohaus angibt, die Membran durch den Filzring der Kammer eine kleine Vorwölbung nach außen erhält. Daß sich die Membran aber nur dann durchbiegen soll, wenn ihr Rand fest eingespannt ist, ist nicht richtig. Vielmehr muß sich das Profil einer einseitig vorgewölbten Membran mit einer Änderung der Temperatur immer derart ändern, daß Erwärmung der Mitte die Membran weiter ausbaucht, Erwärmung des Randes sie wieder strafft, und daß Abkühlung der Mitte die Membran strafft, während Abkühlung des Randes sie wieder ausbaucht.

Hiernach können wir uns das Zustandekommen der Widerstandsschwankungen in erster Annäherung folgendermaßen vorstellen: Durch die beim Einschalten des Stromes entstehende Joulesche Wärme baucht sich zunächst die Mitte der Membran aus; hierdurch wird der Widerstand größer, damit steigt J^2R, die Membran baucht sich weiter aus, und so schaukelt sich R mehr und mehr auf. Allmählich verursacht die von der Membrammitte nach dem Rande abfließende Wärme auch hier eine merkliche Temperaturerhöhung, und diese wirkt der Ausbauchung der Membran entgegen. Mit dem Anwachsen von T_R wächst ihre straffende Wirkung, bis sie schließlich der ausbauchenden Wirkung von T_M gleichkommt und sie vielleicht sogar übertrifft. Damit fängt R wieder an zu sinken. Wie wir in Abschnitt 7 besprechen werden, überlagert sich der straffenden Wirkung der ansteigenden Randtemperatur noch ein zweiter widerstandsvermindernder Effekt; beide zusammen verursachen die Widerstandsumkehr im Maximum der Schwingungen. Mit abnehmendem R nimmt auch J^2R ab, damit die Erwärmung der Mitte, damit wieder die Ausbauchung, und so nähert sich R allmählich seinem unteren Grenzwert. Wenn T_M den tiefsten Wert bereits erreicht hat und damit eine weitere Straffung der Membran nicht mehr bewirken kann, ist T_R noch stark im Absteigen begriffen. Abnehmendes T_R bedeutet Ausbauchung der Membran. Der Widerstand steigt also wieder an, sobald die ausbauchende Wirkung der Randabkühlung die straffende Wirkung der Mittenabkühlung überwiegt. Damit beginnt das Spiel von neuem.

Bevor wir den Einfluß von T_R genauer untersuchen, soll eine qualitative Beobachtung beschrieben werden, die mit der skizzierten Anschauung über den Temperatureinfluß ebenfalls gut übereinstimmt. Ein Mikrophon, das Widerstandsschwankungen ausführt, wird den Strahlen einer Heizsonne ausgesetzt. Zur Verdeutlichung des erwarteten Effektes ist die Randkapazität des Mikrophons künstlich erhöht, indem der die Membran tragende Ring zu einem Hohlring umgearbeitet ist, der noch mit Wasser gefüllt wird. Die Heizsonne wird in einem Moment eingeschaltet, in dem sich der Widerstand R auf dem absteigenden Kurvenast befindet. Der betreffende Punkt ist in der Widerstandskurve (Abb. 4a) durch einen Kreis markiert. R steigt ziemlich plötzlich an, weil zunächst die Membranmitte erheblich erwärmt wird und sich damit ausbaucht. Dann muß R

aber wieder abnehmen, weil die allmählich einsetzende Erhöhung von T_R, die wegen der größeren Wärmekapazität von Membranrand und Metallring langsamer vor sich geht, die Membran wieder strafft. Der Widerstand strebt einem unteren Grenzwert zu. Der umgekehrte Vorgang wie

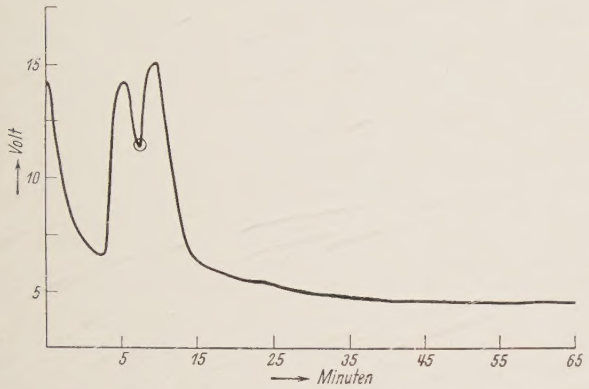

Abb. 4a. Mikrophon unter Einfluß einer Heizsonne.

beim Einschalten der Heizsonne spielt sich beim Ausschalten der Erwärmung ab (Abb. 4b). Die Erklärung für den Kurvenverlauf in Abb. 4b ergibt sich nach dem Gesagten wohl von selbst. Die Kurve in Abb. 4c ist wieder an der unveränderten Mikrophontype aufgenommen. Sie zeigt sehr schön, wie bald nach dem Ausschalten der Heizsonne die Schwingungen wieder einsetzen,

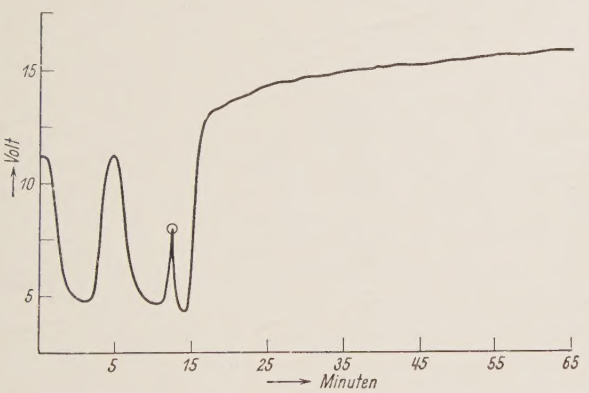

Abb. 4b. Heizsonne ausgeschaltet.

um allmählich immer regelmäßiger und stärker zu werden. Bei den Versuchsreihen gemäß Abb. 4a und 4b erfolgt das Wiedereinsetzen der Schwingungen viel weniger leicht, weil hier die Randkapazität viel größer ist. Die Speisestromstärke betrug bei allen drei Kurven etwa 40 mA.

G. Kretschmer hat die skizzierten Vorstellungen auch in Formeln gefaßt und eine Differentialgleichung für den Temperaturverlauf aufgestellt, deren Lösung in der Tat eine periodische Funktion der Zeit ist. Die theoretischen Werte für die Schwingungsdauer stimmen mit den experimentell gefundenen angenähert überein. Kretschmer wird hierüber gesondert berichten und dabei auch auf einige Punkte eingehen, deren Besprechung der Leser der vorliegenden Arbeit vielleicht vermissen wird.

5. Der Einfluß der Randtemperatur.

Wenn, wie im vorigen Abschnitt angenommen wurde, die Änderung von T_R die einzige Ursache für die Widerstandsumkehr im Minimum ist, so müßte es möglich sein, die Schwankungen dadurch zu unterbinden, daß T_R konstant gehalten wird, und zwar auf einen Wert, der zu dem Widerstandsminimum gehört. Es sei betont, daß dieser Temperaturwert nicht das Minimum von T_R ist,

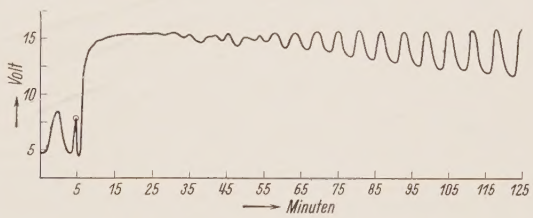

Abb. 4c. Wiedereinsetzen der Schwingungen nach Ausschalten der Heizsonne.

sondern darüber liegt (vgl. Abb. 3). Das Konstanthalten von T_R auf der gewünschten Temperatur kann also durch (schwaches) Heizen des die Membran tragenden Ringes erfolgen. Auf diesem Wege wurde eine Verzögerung des Wiederanstieges von R um etwa zwei bis drei Minuten erreicht. Wurde der Rand im geeigneten Moment ein wenig gekühlt (0,01° C genügte), so wurde der Wiederanstieg von R beschleunigt. Daß trotz des Konstanthaltens von T_R der Widerstand nach wenigen Minuten wieder ansteigt, dürfte daran liegen, daß durch die Heizung des Ringes nicht nur der Membranrand auf konstanter Temperatur gehalten wird, sondern daß auf dem Umwege über die umgebende Luft allmählich auch der Membranmitte Wärme zugeführt wird. Zwecks Ausgleichs dieser Rückwirkung wurde T_R nicht genau konstant gehalten, sondern ganz allmählich um geringe Beträge erhöht. Die Wirkung der allmählich einsetzenden Erwärmung der Mitte wird dann durch die entsprechende Steigerung der Randtemperatur fortlaufend ausgeglichen. Auf diese Weise gelang es in der Tat, den

Widerstand im Minimum beliebig lange konstant zu halten, also die Schwankungen von R zu unterbinden. In einer Versuchsreihe, bei der der Speisestrom etwa 12 mA betrug, mußte T_R im Laufe von $1^1/_2$ Stunden nach und nach um 2,4° C, also je Minute um durchschnittlich 0,02 bis 0,03° C erhöht werden, damit R konstant blieb (Abb. 5). Der Moment, in dem

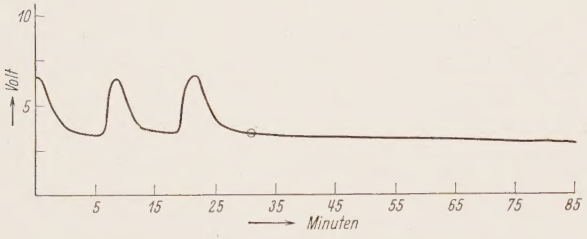

Abb. 5. Konstanthalten der Randtemperatur.

die Ringheizung eingeschaltet wurde, ist in der Kurve wieder durch einen Kreis markiert. Auch bei größeren Stromstärken gelang der Versuch; nur mußte in diesen Fällen die Temperatursteigerung etwas größer sein.

Im Maximum der Widerstandsschwankungen dagegen gelang es nicht, durch Konstanthalten von T_R das Abnehmen des Widerstands wesentlich hinauszuzögern, geschweige denn ganz zu unterbinden. Sogar kleine Senkungen von T_R, die doch eine Ausbauchung der Membran, also eine Widerstandszunahme verursachen, konnten das Absinken des Widerstandes auf die Dauer

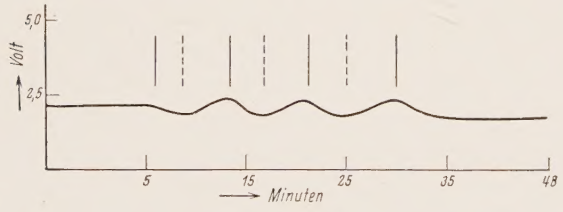

Abb. 6. Periodische Änderung der Randtemperatur.

nicht verhindern. Es wirkt hier offenbar noch ein zweiter, widerstandsvermindernder Effekt mit, auf den wir im Abschnitt 7 zu sprechen kommen.

Den schlagendsten Beweis für die große Bedeutung der Randtemperatur stellt vielleicht folgender Versuch dar: Es wurde für ein bestimmtes Mikrophon festgestellt, bei welcher Speisestromstärke Schwingungen noch sicher auftreten ($J_0 =$ 11 mA), und es wurde bei dieser Stromstärke J_0 die Gesamtänderung von T_R während einer Schwingung gemessen (0,06° C). Dann wurde die Speisestromstärke so weit vermindert, daß selbständig keine Schwingungen mehr auftraten, und es wurde T_R im Bereiche von 0,06° C geändert. Sofort traten Widerstandsschwankungen auf, und zwar in der gleichen Größenordnung wie vorher; sie halten an, solange T_R periodisch geändert wird (Abb. 6). Die Zeitpunkte, in denen die Heizung zwecks Variation von T_R ein- bzw. ausgeschaltet wurde, sind in der Abbildung durch ausgezogene bzw. gestrichelte Linien markiert. Es ist also möglich, durch ganz geringe, periodische Änderungen der Randtemperatur Schwingungen künstlich zu erzeugen.

6. Die Phasenlage der Widerstandsschwankung und der Membranbewegung.

In den Abschnitten 4 und 5 haben wir im wesentlichen mit der Vorstellung operiert, daß der Widerstand R eindeutig durch die Größe der Membranausbauchung A gegeben ist, die ihrerseits eindeutig durch die Temperaturverteilung im Mikrophon festgelegt ist. Grundsätzlich ist es also möglich, das Auftreten von Widerstandsschwankungen aus Temperaturbetrachtungen allein abzuleiten. In Wirklichkeit liegt die Sache aber viel verwickelter. Zu dieser Erkenntnis führt vor allem die genaue Betrachtung der mit den Widerstandsschwankungen Hand in Hand gehenden Membranbewegungen. Aus dem betreffenden Beobachtungsmaterial ist zu ersehen, daß R nicht allein von dem Absolutwert von A abhängt, sondern daß für die Größe von R noch ein zweiter Faktor bestimmend ist, der irreversibel ist.

In Abb. 7 ist die untere Kurve eine Widerstandskurve, während die obere den relativen Verlauf der zugehörigen A-Werte darstellt. Die Kurven zeigen zunächst, daß im Maximum zwischen den A- und den R-Werten (in der Abbildung als J- und V-Werte bezeichnet) eine Phasendifferenz besteht. Sie zeigen ferner, daß zwei gleichen Ausbauchungswerten A_1 und A_2 im auf- bzw. absteigenden Ast zwei verschiedene Widerstandswerte R_1 und R_2 zugehören, wobei R_1 wesentlich größer als R_2 ist. Nebenbei sei bemerkt, daß sich auch auf dem Umwege über die Temperaturen, beispielsweise aus Abb. 3, herleiten läßt, daß zu gleichen A-Werten verschiedene R-Werte gehören. Es ist dabei die Abhängigkeit der A-Werte von den T-Werten näher zu erörtern. Wir können uns aber diese etwas ver-

wickelten Gedankengänge ersparen, da Abb. 7 die erwähnte Tatsache unmittelbar zeigt.

Schon Lohaus hat die Ausbauchung der Membran sichtbar gemacht, indem er auf ihrer Mitte ein Kupferdrähtchen befestigte, dessen Spitze im Mikroskop beobachtet wurde. Wie er kurz erwähnt, hinkt die Membranbewegung der Spannung und dem Widerstande nach. Wir haben zunächst in gleicher Weise wie Lohaus beobachtet und fanden im Maximum der Membranausbauchung ebenfalls ein Nachhinken gegenüber dem Maximum des Widerstandes; dagegen

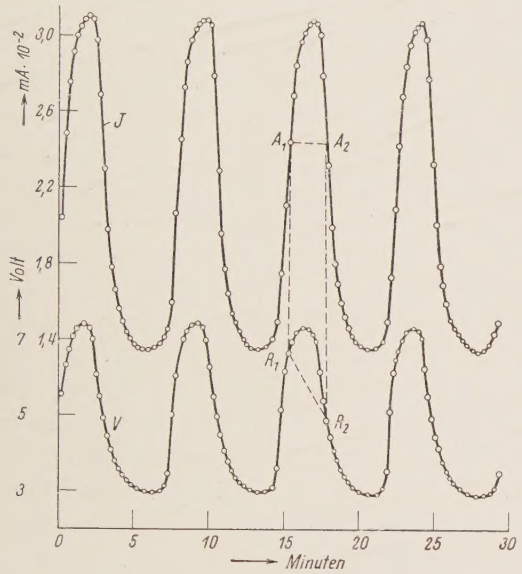

Abb. 7. Phasenlage zwischen Widerstand und Membranausbauchung.

konnte im Minimum eine Phasenverschiebung zwischen A und R bzw. V mit Sicherheit nicht festgestellt werden. Die Größe der Membranausbauchung gibt Lohaus zu $1—2 \cdot 10^{-2}$ mm an; wir fanden ganz ähnliche Werte, $1—3 \cdot 10^{-2}$ mm. Die Genauigkeit der mikroskopischen Beobachtung ließ aber zu wünschen übrig, namentlich im Minimum der A-Kurven. Deshalb wurde noch eine andere Meßanordnung benutzt, die allerdings nur den relativen Verlauf der Membranausbauchung liefert. Die Membran des zu untersuchenden Mikrophons wurde durch ein Quarzstäbchen mit der Membran eines Meßmikrophons gekoppelt. Um die Kopplung einfach bewerkstelligen zu können, war die Kohlemembran des Meßmikrophons durch eine nicht eingespannte Messingplatte ersetzt, die etwas größer als der Querschnitt der Kohlekammer war. Durch das Meßmikrophon floß ein Strom von nur wenigen hundertsteln Milliampère, so daß eine merkliche Änderung seines Widerstandes und damit seiner Stromstärke durch Joulesche Wärme nicht in Frage kam. Somit gibt der Stromverlauf im Meßmikrophon ein Maß für die Membranbewegung des Hauptmikrophons. Wenn sich die Membran des Hauptmikrophons ausbaucht, so drückt sie die Messingplatte fester gegen das Kohlepulver des Meßmikrophons, so daß eine Widerstandsabnahme, also Stromzunahme, resultiert; der umgekehrte Vorgang tritt bei einer Straffung der Membran des Hauptmikrophons ein[7]). Für die Ausbauchungskurve A sind also in Abb. 7 als Ordinaten die Stromstärken im Meßmikrophon aufgetragen. Auch diese Meßmethode war nicht ideal. Sie führte aber im wesentlichen zu den gleichen Ergebnissen wie die mikroskopische Beobachtung. Wir glauben somit aus unseren Beobachtungen, die mit verschiedenen Abänderungen mehrfach wiederholt wurden, schließen zu müssen, daß im Minimum eine merkliche Phasendifferenz zwischen den A- und R-Werten nicht besteht, während im Maximum die Ausbauchung dem Widerstand nachhinkt. Hieraus ist dann ganz kraß und unmittelbar zu sehen, daß zur Widerstandsumkehr im Maximum neben der rein temperaturbedingten Straffung der Membran noch ein zweiter widerstandsvermindernder Effekt mitwirkt. Im Minimum dagegen würde die durch die Abkühlung des Randes hervorgerufene Ausbauchung der Membranmitte allein ausreichen, um die Widerstandsumkehr zu erklären.

Auch die Rückwand des Mikrophongehäuses, auf der die Kohlekammer aufsitzt, führt kleine Bewegungen aus, die mit den Widerstands-

[7]) Die gleiche Meßanordnung wurde gelegentlich benutzt, um zu zeigen, daß unabhängig von den sonstigen Vorgängen im Mikrophon durch Erwärmung des Randes — und zwar auch schon durch eine sehr geringe Erwärmung — eine Straffung der Membran hervorgerufen wird (Abschnitt 4). Zu diesem Zweck wird der Membranrand des Hauptmikrophons, das jetzt nicht vom Speisestrom durchflossen wird, durch elektrische Heizung des die Membran tragenden Metallringes erwärmt. Es resultiert in der Tat zunächst eine starke Abnahme der Stromstärke im Meßmikrophon, die nur durch eine Straffung der Membran des Hauptmikrophons zustandekommen kann. Daß nach kurzer Zeit der Strom wieder ansteigt, ist darauf zurückzuführen, daß die Erwärmung im Hauptmikrophon vom Rande der Membran nach der Mitte hin fortschreitet, so daß auf die Straffung eine Ausbauchung folgt.

schwankungen Hand in Hand gehen. Diese Bewegungen wurden nach dem gleichen Verfahren untersucht wie die Membranbewegungen. Sie verlaufen in dem gleichen Sinne wie diese, bei Erwärmung nach außen. Ihre Extreme hinken denen der Widerstandskurve nach; ihre Amplitude betrug größenordnungsmäßig 5% der Membranamplitude. Wir wollen auf diese Bewegungen, die nur eine untergeordnete Rolle spielen, nicht näher eingehen; sie sollten nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

7. Irreversible Widerstandsänderungen.

Unabhängig von der Phasenlage bleibt die am Anfang des vorigen Abschnitts bereits hervorgehobene Tatsache bestehen, daß gleichen A-Werten im auf- und absteigenden Kurvenast verschiedene R-Werte zugehören (Abb. 7). Es steht also zweifelsfrei fest, daß der Mikrophonwiderstand nicht nur von der Größe der Ausbauchung abhängt, sondern daneben noch von einem zweiten Faktor, der nicht reversibel ist. Wir kommen damit auf ein Gebiet, auf dem noch große Unsicherheit herrscht. Die Frage der losen Kontakte ist eine so verwickelte, daß selbst krasse Widersprüche zwischen einzelnen Autoren noch ungeklärt sind. Wir dürfen also nicht damit rechnen, schon endgültige Aussagen über die Widerstände machen zu können. Vielmehr muß es z. Zt. genügen, die Möglichkeiten aufzuzeigen, wie die Vorgänge widerspruchslos dargestellt werden können.

Lohaus arbeitet mit einer sehr einfachen und anschaulichen Vorstellung, die bereits im ersten Abschnitt kurz erwähnt wurde. Während sich die Membran ausbaucht, soll die Spannung zwischen den einzelnen Kohleteilchen der Füllung schließlich so groß werden, daß sich Fünkchen bilden, welche die Körnchen unter entsprechender Widerstandserniedrigung miteinander verschweißen. Beim Rückgang der Ausbauchung drückt die Membran auf das zusammengeschweißte Kohlegerüst, bis es schließlich unter entsprechender Widerstandserhöhung zusammenbricht, womit der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt sein soll. Wir haben zwar als Hauptursache für die Entstehung der Schwankungen bereits etwas anderes kennengelernt, nämlich die Phasendifferenz zwischen den T_M- und den T_R-Kurven. Trotzdem könnte eine gewisse Verschweißung vielleicht gelegentlich mitwirken. Freilich stößt man mit der skizzierten Vorstellung im einzelnen auf erhebliche Schwierigkeiten. Zum Zusammenschweißen von Kohlekontakten soll eine „kritische" Kontaktspannung von etwa 1,5 V gehören[8]). Wir beobachteten Widerstandsschwankungen aber auch dann, wenn auf etwa 15 hintereinanderliegende Kontaktstellen im ganzen nicht mehr als 5 V Spannung kamen. Ob die kritische Spannung an dem einen oder anderen Kontakt wirklich erreicht war, ist also zum mindesten unsicher. Ferner bildeten sich Schwingungen auch bei Mikrophonen aus, die wir mit Graphit gefüllt hatten. Bei Graphit ist aber unseres Wissens Verschweißung überhaupt noch nicht beobachtet worden. Natürlich ist auch damit noch kein strikter Gegenbeweis gegen die Lohaussche Annahme erbracht. Wie wir besprochen haben, reicht nämlich das Vorhandensein einer Phasendifferenz zwischen den T_M- und T_R-Kurven allein schon aus, um Widerstandsschwankungen hervorzubringen. Die bei Graphitfüllung beobachteten Schwankungen könnten also sehr wohl anders zustandekommen und anderen Gesetzmäßigkeiten gehorchen als die bei Kohlefüllung entstehenden. Im ganzen erscheint es auf Grund unserer Beobachtungen aber doch ratsam, sich nicht einseitig auf die Lohaussche Vorstellung festzulegen, sondern auch andere Möglichkeiten in Betracht zu ziehen. Vor allem ist mit der Annahme des Zusammenbrechens eines zusammengeschweißten Kohlegerüstes im Minimum der Schwingungen kaum vereinbar, daß allein durch Konstanthalten der Randtemperatur auf dem dem Widerstandsminimum zugehörigen Werte die Widerstandsumkehr verhindert werden konnte (Abschnitt 5).

Der irreversible Vorgang könnte bedingt sein durch das Verhalten des Kohlematerials an den Kontaktstellen, durch das Verhalten der Gase innerhalb und außerhalb der Kontaktstellen sowie der adsorbierten Gase oder auch durch beides. Wenn wir zunächst an die Kohle selbst denken, so stellt man sich die Kontaktwiderstände als sogenannte Siebwiderstände vor. Infolge der Rauheit der Oberfläche berühren sich die Kohleteilchen in den Grenzflächen nur in einzelnen Spitzen oder äußerst kleinen Teilflächen, in anderen Teilflächen wieder nicht. Durch den Druck der

[8]) E. Lübcke, Handbuch der Technischen Akustik (herausgegeben von E. Waetzmann), erster Teil S. 168, 1934.

Membran kann eine Deformation der Kohlespitzen hervorgerufen werden, die nicht vollkommen elastisch ist. Das würde heißen, daß die Deformation bei Aufhören des Druckes nicht vollkommen zurückgeht, oder mit anderen Worten, daß der Vorgang teilweise irreversibel ist. Ob der irreversible Teil daher rührt, daß die Spitzen durch die starke Erwärmung plastisch werden, oder daher, daß sie bei erhöhtem Druck teilweise abgebrochen werden, sei dahingestellt. In jedem Falle erscheint es einleuchtend, daß eine Widerstandsvergrößerung eintritt, wenn von einem bestimmten Ausgangsdruck aus gerechnet der Kontaktdruck zunächst vergrößert und dann auf den Ausgangswert verkleinert wird. Bei der Druckerhöhung wird nämlich ein Teil der wirklichen Berührungsstellen in den Grenzflächen abgeschliffen (durch Abbrechen oder plastische Verformung), so daß bei Wiederabnahme des Druckes, also Zurückgehen der Kohleteilchen in die ursprüngliche Lage, weniger sich berührende Spitzen vorhanden sind als vorher. Während wir die Lohausse Vorstellung mit dem Schlagwort „Verschweißung" bezeichnen können, soll die eben skizzierte Vorstellung durch das Schlagwort „unelastische Deformation" gekennzeichnet werden[9]). Diese „unelastische Deformation" würde es also verständlich machen, daß der zu einem Ausbauchungswert A_1 auf dem aufsteigenden Ast gehörende Widerstand R_1 größer ist als der zu dem gleichen Ausbauchungswert A_2 auf dem absteigenden Ast gehörende Widerstand R_2 (Abb. 7).

Es bliebe noch das Nachhinken des Maximums der Membranausbauchung gegenüber dem Widerstandsmaximum zu erklären, oder mit anderen Worten, die Tatsache, daß der Widerstand absinkt, bevor die Membranausbauchung ihr Maximum erreicht hat. Es ist sehr wohl denkbar, daß mit wachsender Ausbauchung soviel Raum geschaffen wird, daß die Kohleteilchen, die sich zunächst nur mehr und mehr lockern, schließlich zusammensacken, so daß eine Art Grenzwiderstand erreicht wird, der nicht überschritten werden kann. Natürlich darf man sich das nicht so vorstellen, daß Hohlräume von der Größe der Körnchen entstehen, in welche die Körnchen hineinfallen, denn dazu ist die Schwingungsamplitude viel zu klein; aber doch so, daß die oberen Kohleschichten auf die tiefer liegenden nachdrücken, so daß eine festere Packung und damit Widerstandsabnahme resultiert. Daneben oder auch allein für sich könnte in dem gleichen Sinne noch ein anderer Effekt wirken, den wir kurz als „Gaseffekt" bezeichnen wollen. Beim Stromdurchgang durch das Kohlepulver treten an den Kontaktstellen sehr erhebliche Temperaturerhöhungen auf. Das innerhalb der Kontaktflächen befindliche Gas, das wie eine Art Polster wirkt, dehnt sich aus und vergrößert dadurch im ersten Augenblick den Widerstand. Im gleichen Sinne wirkt das Freiwerden von adsorbiertem Gas. Die im ersten Moment bei der Erwärmung zu erwartende Widerstandszunahme wird aber sehr schnell in eine Widerstandsabnahme umschlagen, indem das zwischen den Grenzflächen befindliche Gas seitlich entweicht, so daß eine innigere Berührung zwischen den Kohleteilchen zustandekommt. Wir begnügen uns absichtlich mit einer ganz rohen Skizzierung der Vorgänge, weil sich der Gaseffekt je nach den näheren Umständen nicht nur verschieden stark, sondern auch in verschiedener Richtung auswirken kann. Es ist überhaupt noch wenig geklärt, welche Rolle das Gas im einzelnen bei der Widerstandsaussteuerung von Kohlekörnern spielt[10]). R. Otto[11]) gibt gelegentlich einer interessanten Untersuchung über das Rauschen von Kohlemikrophonen an, daß eine Widerstandsaussteuerung auch bei Fortfall jeder Fremdschicht oder Gashaut vorhanden ist, während nach C. A. Hartmann und I. Ebeling[12]) der Mikrophoneffekt bei der Entgasung von Kohlegrieß verschwinden und bei Luftzutritt sich wieder einstellen soll. Unsere Vorstellung über den „Gaseffekt" ist gut vereinbar mit Beobachtungen von P. S. Olmstead[13]), dagegen kaum vereinbar mit Beobachtungen, die R. Otto in der eben genannten

[9]) Vgl. auch F. S. Goucher, Journ. of the Franklin Institute **217**, 407, 1934.

[10]) Es verdient in diesem Zusammenhange vielleicht erwähnt zu werden, daß sich der Wert der Aussteuerung $\frac{r}{R}$ ebenfalls periodisch ändert, und daß das Maximum von $\frac{r}{R}$ zeitlich früher liegt als das Maximum von R. Diese Tatsache, die schon aus einer Kurvenaufnahme bei Schubert hervorgeht, zeigte sich auch wieder deutlich bei ähnlichen von uns durchgeführten Messungen.

[11]) R. Otto, Hochfrequenztechnik und Elektroakustik **45**, 187, 1935.

[12]) E. Lübcke, a. a. O. S. 167.

[13]) P. S. Olmstead, The Journal of Physical Chemistry **33**, 69, 1929.

Arbeit beschreibt. Hiernach soll der Widerstand von Kohlepulver bei Anwesenheit eines Gases zwar kurz nach Einschalten des Speisestromes ein wenig absinken, dann aber allmählich stark ansteigen. Das Kohlepulver befand sich bei diesen Versuchen in einem senkrecht stehenden Glasröhrchen; die Kohleelektroden waren an Kupferbleche angeschraubt, die durch eine Glasschmelzung in festem Abstand gehalten werden sollten. Hierdurch sollte verhindert werden, daß infolge Joulescher Wärme der Elektrodenabstand wächst, wodurch dann in trivialer Weise eine Widerstandserhöhung bewirkt würde. Auf Grund unserer Erfahrungen über merkliche Membranbewegungen der Mikrophone auch schon bei minimalen Temperaturänderungen hielten wir es aber nicht für ausgeschlossen, daß die von Otto

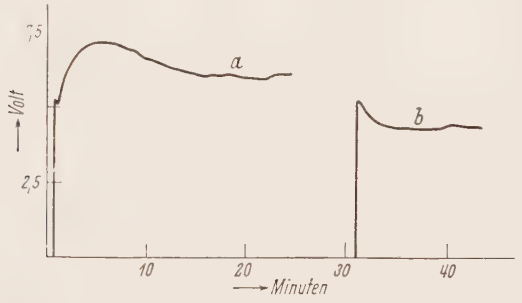

Abb. 8. Kohlepulver in Glasrohr und in Quarzrohr.

beobachteten Widerstandserhöhungen doch durch Volumen- und Abstandsänderungen in dem Glasrohr verursacht wurden, mit dem eigentlichen „Gaseffekt" also nicht viel zu tun haben. Wir wiederholten deshalb die Versuche unter entsprechend verschärften Vorsichtsmaßregeln und fanden dann in der Tat bei Stromdurchgang keine allmähliche Widerstandszunahme des Kohlepulvers, sondern nur Widerstandsabnahme. In Abb. 8 stellt Kurve *a* den Widerstandsverlauf dar, wie wir ihn in einem Glasröhrchen fanden, das nach den Angaben von Otto konstruiert war; Kurve *b* zeigt den Widerstandsverlauf in einem Quarzröhrchen, bei dem also Abstands- und Volumenänderungen sicherer vermieden sein dürften. Die Stromstärke betrug in beiden Fällen 35 mA. Wir messen diesen Beobachtungen weiter keine Bedeutung bei, da sie nur nebenher angestellt wurden. Sie sollen nur zeigen, daß die Ottoschen Beobachtungen kein Beweis gegen die Richtigkeit unserer Vorstellung sind. Der Gaseffekt würde in dem auf- und absteigenden Ast der *R*-Kurven in dem gleichen Sinne wirken, also im Maximum zur Widerstandsumkehr beitragen, im Minimum dagegen nicht. Hierdurch wird auch verständlich, daß die Widerstandsmaxima spitzer verlaufen als die Minima. Daß der ansteigende Kurvenast steiler verläuft als der absteigende, dürfte in erster Linie auf die Mitwirkung der unelastischen Deformation zurückzuführen sein.

8. Kohlepulver in anderen Anordnungen.

Um ein möglichst abgerundetes Bild von den Vorgängen zu bekommen, beschränkten wir uns nicht auf Beobachtungen an Mikrophonen, sondern untersuchten auch Kohlepulver, das in Röhrchen zwischen zwei Zuleitungsstöpseln angeordnet war, wobei das Material und die Dimensionen der Röhrchen und der als Elektroden dienenden Stöpsel variiert wurden. Vorweg sei bemerkt, daß in vielen Fällen auch hier bei Beschickung mit konstantem Gleichstrom mehr oder weniger stark ausgeprägte, periodische Widerstandsschwankungen auftraten.

Als Rohrmaterial wurden verwendet: Hartgummi, Glas und Quarz; Hartgummi wegen seines großen und Quarzglas wegen seines kleinen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Als Stöpselmaterial dienten: Hartgummi, Bogenlampenkohle und Messing; auf die Hartgummistöpsel wurde Membrankohle aufgekittet. Bei allen drei Sorten des Rohrmaterials wurden Rohre von 8, 10 und 14 mm Durchmesser verwendet; die Länge der mit Kohlepulver angefüllten Rohrstücke wurde zu 6, 10 und 14 mm gewählt. Die Stöpsel waren in die Rohre gut eingepaßt, ohne sonst besonders fixiert zu sein.

In Abb. 9 bezieht sich die untere Kurvenreihe auf Hartgummirohre, die mittlere auf Glas- und die obere auf Quarzrohre; bei den linken Kurven aller drei Reihen bestanden die Stöpsel aus Hartgummi, bei den mittleren aus Kohle und bei den rechten aus Messing. Die bei jeder Kurve an die Ordinaten angeschriebenen Zahlenwerte geben jeweils etwa die Minimalspannung an. Für die mit *a* bezeichneten Kurven gilt der Maßstab *a*, für die mit *b* bezeichneten Kurven der Maßstab *b*. Die Rohrdurchmesser bei allen neun Kurven betrugen 8 mm und die Stöpselabstände 6 mm. Die Speisestromstärken variierten zwischen 65 und 85 mA.

Wie wir erwarteten und wie Temperaturmessungen bestätigten, bestand zwischen den

Temperaturschwankungen im Kohlepulver und im Stöpsel ein Phasenunterschied, der mit wachsendem Abstand von dem die Kohlekammer abschließenden Ende des Stöpsels zunimmt. Grundsätzlich erklärt sich der Widerstandsverlauf also in gleicher Weise wie bei den Mikrophonen, was wir im einzelnen wohl nicht auseinanderzusetzen brauchen. Erwärmung der Rohrwände gibt Vergrößerung der Kohlekammer, Erwärmung der Stöpsel, die ja von der Seite der Kohlekammer aus beginnt, gute Leitfähigkeit, so daß sehr schnell größere Längen des Stöpsels (von der Kohlekammer aus gerechnet) erwärmt werden und zur Wirkung kommen. Wird ein längeres Stück des Hartgummirohres mit Kohlepulver gefüllt und der Querschnitt erweitert, so werden auch mit Messingstöpseln die Kurven wieder regelmäßiger.

Da für die Entstehung der Schwingungen die Bewegung der Stöpsel besonders wichtig ist, hatten wir erwartet, daß die Schwingungen aus-

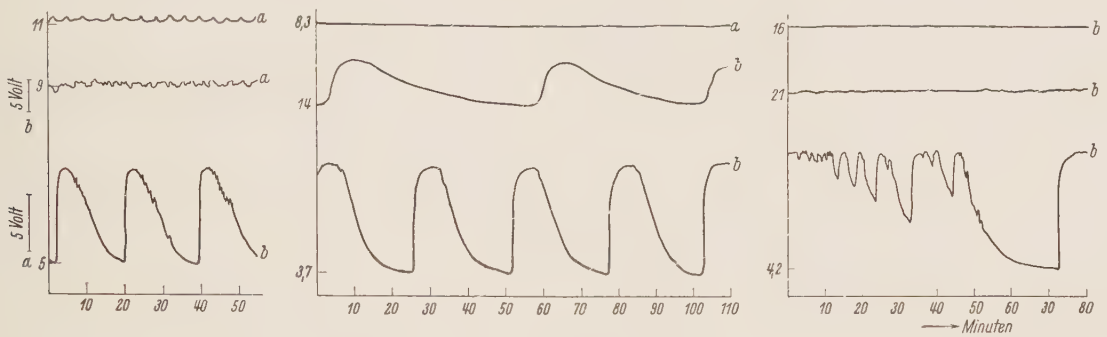

Abb. 9. Widerstandsschwankungen von Kohlepulver in verschiedenen Anordnungen.

Verkleinerung der Kammer. Zum Verständnis der Unterschiede in den neun Kurven der Abb. 9 ist auch die Verschiedenheit der Wärmeleitung und der Wärmeausdehnungskoeffizienten zu berücksichtigen.

Zahlentafel.

Material	Wärmeausdehnungskoeffizient	Wärmeleitung
Glas, Thüringer	$0{,}0_594$	$0{,}0_214$—$0{,}0_218$
Glas, Geräte	$0{,}0_545$	$0{,}0_214$—$0{,}0_218$
Hartgummi	$0{,}0_48$	$0{,}0_338$
Quarzglas	$0{,}0_656$	$0{,}0_24$
Lichtkohle	$0{,}0_503$—$0{,}0_515$	
Messing	$0{,}0_418$	0,18—0,3
gekörnter Anthrazit	$0{,}0_42$	$0{,}0_34$

In einigen Kurven machen sich schwache, in der dritten Kurve der untersten Reihe (Hartgummirohr, Messingstöpsel) sogar außerordentlich starke Unregelmäßigkeiten bemerkbar. Sie dürften daher rühren, daß die Bewegung der Stöpsel wegen der nicht idealen Einpassung in das Rohr etwas unregelmäßig verläuft, und daß sich bei stärkeren Bewegungen mehrere Kohlekörnchen auf einmal von ihren alten Kontakten lösen, sich auf neue Spitzen legen und damit sprungweise den Widerstand ändern. Die Messingstöpsel besitzen nicht nur einen verhältnismäßig großen Ausdehnungskoeffizienten, sondern auch eine sehr bleiben würden, wenn das mit Kohlepulver gefüllte Rohrstück zwischen zwei Kohleklötze geklemmt wird. Bei dem Glasrohr trat das auch ein. Der Widerstand blieb stundenlang konstant; auch mehrfaches Anstoßen konnte die Schwingungen nicht hervorrufen. Anders bei dem Hartgummirohr. Hier traten wieder Widerstandsschwankungen auf, die allerdings eine etwa doppelt so lange Periode hatten, wie die unter sonst gleichen Bedingungen mit Kohlestöpseln aufgenommenen Schwingungen. Verlängerung der Periode deutet aber im allgemeinen schon auf Erschwerung der Schwankungen hin. Daß sie überhaupt zustandekommen, ist kaum anders zu verstehen, als daß die Teile der Begrenzungsblöcke, die in Richtung oder unmittelbar neben der Rohrachse liegen, stärker temperiert sind als die Teile in der Nähe der Rohrwandung. Dann kommen bei Temperaturschwankungen ähnliche Bewegungen wie bei einer Membran zustande, wenn auch nur in ganz geringem Ausmaße. Beim Hartgummirohr, wo infolge des größeren Ausdehnungskoeffizienten die Schwingungen an sich leichter entstehen als beim Glasrohr (Abb. 9), reichen diese geringen Bewegungen als Anstoß aus. Hiermit soll aber nicht behauptet werden, daß die Beobachtungsergebnisse bereits restlos geklärt werden konnten. Die Untersuchungen an den

Röhrchen trugen mehr orientierenden Charakter, so daß wir zahlreiche Einzelheiten nicht weiter verfolgt haben.

9. Widerstandsschwankungen bei konstanter Spannung.

Schubert gibt in seiner Arbeit an, daß bei konstanter oder annähernd konstanter Spannung Schwingungen nicht auftreten. Ferner gibt er — und ebenso Lohaus — an, daß sämtliche untersuchten Mikrophone bei konstanter Stromstärke die Schwingungen zeigten, wenn nur Stromstärke und Einschaltdauer genügend groß gewählt wurden. Dagegen fanden wir unter den sehr verschiedenen uns zur Verfügung stehenden Mikrophonen Exemplare, die bei konstanter Stromstärke keine Schwingungen gaben, wohl aber bei konstanter Spannung. Es waren dies Mikrophone von Mix und Genest, deren Membranen nicht glatt waren, sondern in der Mitte eine nach der Kohlekammer hin gerichtete und in diese hineinragende kegelförmige Ausbuchtung besaßen. Unter den Mikrophonen mit derartig profilierten Membranen gibt es aber auch Exemplare, vielleicht sogar ganze Typen, die Schwingungen bei konstanter Stromstärke liefern; nach unseren bisherigen Beobachtungen allerdings nicht sehr ausgeprägte Schwingungen. Es kommt offenbar ganz auf die Einzelheiten der Bauweise an. Wir betonen ausdrücklich, daß wir nicht generelle Aussagen über das Verhalten verschiedener Mikrophontypen machen wollen. Hierzu reichen unsere Beobachtungen noch nicht aus. Freilich konnte, nachdem wir etwas Erfahrung gesammelt hatten, in der Regel richtig vorhergesagt werden, wie sich ein Mikrophon bezüglich der Widerstandsschwankungen verhalten würde. Ebenso gelang es, durch einen kleinen Kunstgriff Widerstandsschwankungen bei konstanter Spannung auch in solchen Mikrophonen anzuregen, die sie vorher nur bei konstanter Stromstärke gaben.

Daß die kegelförmige Ausbuchtung der Membran für die Entstehung der Schwingungen bei konstanter Stromstärke ungünstig wirken muß, geht aus der folgenden Überlegung hervor. Schon Lohaus hat betont, daß Schwingungen nur dann auftreten, wenn sich die Membran bei Erhöhung der Pulvertemperatur nach außen ausbaucht. Hierzu ist notwendig, daß sie bereits eine kleine Vorwölbung nach außen hin besitzt. Entsprechend konnte Lohaus die Entstehung von Schwingungen unterbinden, indem er die Membran künstlich ein wenig nach innen vorwölbte. Ähnlich wie eine Vorspannung nach innen wird die nach innen gerichtete kegelförmige Ausbuchtung wirken. Beim Einschalten des Speisestroms erwärmt sich zunächst der Kegel, wodurch er stärker gegen die Kohlefüllung drückt, also eine Widerstandsverkleinerung hervorruft. Damit sinkt auch die Joulesche Wärme. Wird dann allmählich die übrige Membran erwärmt, so baucht sie sich infolge der durch den Filzring bewirkten Vorspannung zwar nach außen hin aus, aber die mit wachsender Erwärmung wieder zunehmende Kegelvergrößerung wirkt der Widerstandserhöhung sofort entgegen. Das Umgekehrte tritt bei Abkühlung von Kegel und Membran ein. Ausbauchung bzw. Profiländerung und Widerstand werden sich also bald einem Gleichgewichtszustand nähern.

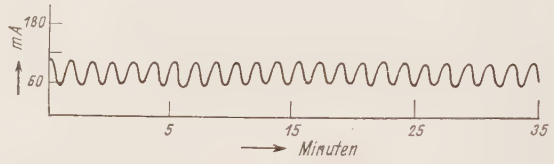

Abb. 10. Widerstandsschwankungen bei konstanter Spannung.

Die Verhältnisse ändern sich grundlegend, wenn an ein Mikrophon von der beschriebenen Bauweise konstante Spannung gelegt wird. Dann treten Widerstandsschwankungen auf, die durch die sie begleitenden Stromschwankungen gemessen werden können. Abb. 10 gibt ein Beispiel. Die Schwankungen erfolgen völlig regelmäßig und sind relativ sehr stark; die Stromstärke variiert zwischen etwa 55 und 110 mA. Die Spannung wurde bei dieser Aufnahme auf etwa 12% konstant gehalten. Die Erklärung ergibt sich in dem allgemeinen Rahmen unserer Gedankengänge wohl von selbst. Bei der Erwärmung des Kegels, die eine Widerstandsverkleinerung bewirkt, nimmt jetzt die Joulesche Wärme zu, da V konstant gehalten wird; damit dehnt sich der Kegel weiter aus und die Widerstandsabnahme schreitet weiter fort. Wenn sich dann die übrige Membran erwärmt und nach außen ausbaucht, nimmt der Widerstand zu, die Joulesche Wärme nimmt ab, damit auch die Ausdehnung des Kegels, und so strebt der Wider-

stand seinem oberen Grenzwert zu. Während für die Schwingungen bei konstanter Stromstärke das Gegenspiel von Membranmitte und Membranrand entscheidend ist, ist es für die Schwingungen bei konstanter Spannung das Gegenspiel zwischen kegelförmiger Ausbuchtung und den benachbarten Membranteilen. Selbstverständlich wirken auch hier noch die in Abschnitt 7 besprochenen Faktoren mit.

Aus den skizzierten Vorstellungen folgt, daß für das Nichtauftreten von Schwingungen bei konstanter Spannung gerade der Umstand verantwortlich zu machen ist, der für das Auftreten der Schwingungen bei konstanter Stromstärke Voraussetzung ist. Es ist dies die übliche schwache Vorwölbung der Membran nach außen hin. Sie muß nicht nur aufgehoben, sondern sogar in ihr Gegenteil verwandelt werden, wenn Schwingungen bei konstanter Spannung entstehen sollen. Ein entsprechender Versuch führte zu einem positiven Ergebnis. Auf weitere Einzelheiten dieser interessanten Wechselbeziehungen möchten wir im Rahmen der vorliegenden Mitteilung nicht eingehen. Sie wurden hier nur erwähnt, um das Gesamtbild von dem Zustandekommen der Schwankungen abzurunden. Bemerkt sei noch, daß Widerstandsschwankungen bei konstanter Spannung gelegentlich auch an Kohlepulver beobachtet wurden, das gemäß der Beschreibung in Abschnitt 8 in Röhrchen angeordnet war. Wir hoffen, auf alle diese Fragen in absehbarer Zeit zurückkommen zu können.

10. Zusammenfassung.

Die periodischen Widerstandsschwankungen, die bei konstanter Speisestromstärke an nicht betönten Kohlemikrophonen auftreten, wurden näher untersucht. Es ergab sich, daß die begleitenden Temperaturschwankungen in der Mitte und am Rande der Membran eine erhebliche Phasendifferenz gegeneinander besitzen, und daß diese Phasendifferenz für die Entstehung der Schwingungen von großer Bedeutung ist. Der beherrschende Einfluß der Randtemperatur im Minimum der Schwingungen ist daraus zu ersehen, daß die Schwingungen durch angenähertes Konstanthalten der Randtemperatur unterbunden und durch periodische Veränderung derselben künstlich erzeugt werden können. Die Untersuchung der Membranbewegung im Zusammenhang mit der Widerstandsschwankung zeigt, daß im Maximum der Schwingungen neben der temperaturbedingten Membranstraffung noch ein zweiter widerstandsvermindernder Effekt mitwirkt. Fernerhin zeigt sich, daß gleichen Ausbauchungswerten der Membran je nach dem Richtungssinn, in dem sie durchlaufen werden, verschiedene Widerstandswerte zugehören. Die Erklärung ergibt sich aus dem Verhalten des Kohlepulvers bzw. der umgebenden Luftschichten. Kohlepulver, das nicht in Mikrophonen, sondern in Röhrchen zwischen zwei als Zuleitungselektroden dienenden Stöpseln angeordnet ist, gab ebenfalls periodische Widerstandsschwankungen. Auch hier ist der Grund in erster Linie in der örtlich und zeitlich verschiedenen Wärmeausdehnung des das Kohlepulver enthaltenden Gehäuses zu suchen. Endlich wurde festgestellt, daß bestimmte Mikrophontypen die Schwingungen auch bei konstanter Spannung geben; diese Schwankungen lassen sich in ähnlicher Weise deuten wie die Schwankungen bei konstanter Stromstärke.

(Eingegangen am 27. Januar 1936.)

Temperaturmessungen an Kohlemikrophonen.

(Mitteilung aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule zu Breslau.)

Von **G. Kretschmer** und **A. Ueberschuß**, Breslau.

DK **621.395.613.32**

Im Rahmen der vorstehenden Arbeit von E. Waetzmann und G. Kretschmer über Mikrophonschwankungen war es notwendig, die Temperaturverhältnisse in Mikrophonen genau zu untersuchen.

Bei der Wahl der Meßinstrumente war zu beachten, daß durch ihre Anbringung im Mikrophon die Schwingungen nicht gestört oder gar verhindert wurden. Ihre Trägheit mußte klein sein, da, wie sich im folgenden zeigen wird, kleine Phasendifferenzen zwischen Temperaturschwingungen zu messen waren. Diese Anforderungen konnten nur Thermoelemente und Widerstandsdrähte erfüllen.

Vorversuche zeigten, daß Widerstandsdrähten der Vorzug vor Thermoelementen zu geben war.

Abb. 1. Widerstandsdraht im Kapillarrohr.

Die Widerstandsdrähte waren Wollastondrähte mit 6 μ Platinseele, von denen die Silberschicht nach dem im hiesigen Institut ausgearbeiteten elektrolytischen Verfahren[1]) entfernt wurde. Um die Wollastondrähte in den Kohlegrießbehälter des Mikrophons bringen zu können, zogen wir sie nach Herausätzen der Meßstelle in ein Kapillarrohr (Abb. 1). Die Länge der Ätzstelle war kleiner als der Durchmesser des Kohlegrießbehälters. Der Innendurchmesser der Kapillarrohre betrug durchschnittlich 160 μ und die Stärke der Glaswand 70 μ. Die Enden des Kapillarrohres wurden mit einem Bleioxyd-Glyzerinkitt, der Temperaturen bis zu 280° C verträgt, verschlossen. Es war noch zu prüfen, ob die Trägheit der Widerstandsdrähte auch dann, wenn sie im Kapillarrohr waren, noch genügend klein blieb. Messungen zeigten, daß ihre Trägheit nicht größer war als die des Brückennullinstruments.

Es wurden auch Messungen vorgenommen, bei denen sich die Widerstandsdrähte nicht im Kapillarrohr befanden, sondern ungeschützt auf dem Metallring, der die Membran trägt, oder auf der Membran selber festgekittet waren. Das Aufkitten geschah folgendermaßen: aus den Wollastondrähten war nur ein kleines Stück herausgeätzt. Die beiden Enden der Drähte wurden dazu in eine Stativklammer eingespannt. Zum Aufkitten wurden nun die festgeklammerten Drähte in waagerechte Lage gebracht. Metallring bzw. Membran, auf einem Vorschub befestigt, konnten dann langsam an die Ätzstelle herangebracht werden. Der Kitt verlief, wenn er weich genug angerührt war, ohne die Drähte zu zerreißen.

Die Temperaturmessungen wurden folgendermaßen durchgeführt: die Wollastondrähte befanden sich als unbekannte Widerstände in Brückenschaltungen. Das Mikrophon wurde zur Eichung der Meßdrähte in einen Thermostaten gebracht. Der Thermostat konnte jede Temperatur zwischen Zimmertemperatur und 200° C konstant halten. Der Ausschlag des Brückennullinstruments wurde in Temperaturgraden geeicht. Um bei der Messung des Temperaturverlaufs genaue Kurven zu erhalten, mußten die Ablesungen in Abständen von nur 15 Sekunden erfolgen. Bei großer Empfindlichkeit der Anordnung und bei großen Temperaturintervallen wurden die Ausschläge allmählich zu groß. Man mußte sie durch Wahl neuer Vergleichswiderstände auf Null zurückbringen. Dieses Umschalten erfolgte sehr schnell und störte selbst bei schnellen Schwankungen nicht den Verlauf der Messungen. Das Mikrophon blieb auch während der Messungen im Thermostaten und war so gegen Störungen schon weitgehend geschützt. Um störende Einflüsse noch weiter herabzusetzen, erfolgten die Ablesungen im Nachbarzimmer.

Von den zahlreichen Kurvenaufnahmen geben wir in Abb. 2 ein Beispiel. Das Mikrophon war eine ZB-Type von Mix und Genest mit glatter Membran. Diese Type eignete sich für unsere Messungen besonders gut, da sie im Gegensatz zu den Ausführungsarten anderer Firmen leicht geöffnet werden konnte.

[1]) E. Waetzmann, M. Gnielinski, H. Heisig, Zeitschr. f. Physik **58**, 469, 1929.

Im Mikrophon waren drei Wollastondrähte angebracht. Ihr Widerstand betrug etwa 50 Ohm, der durchgeschickte Strom 5 bis 10 mA. Ein

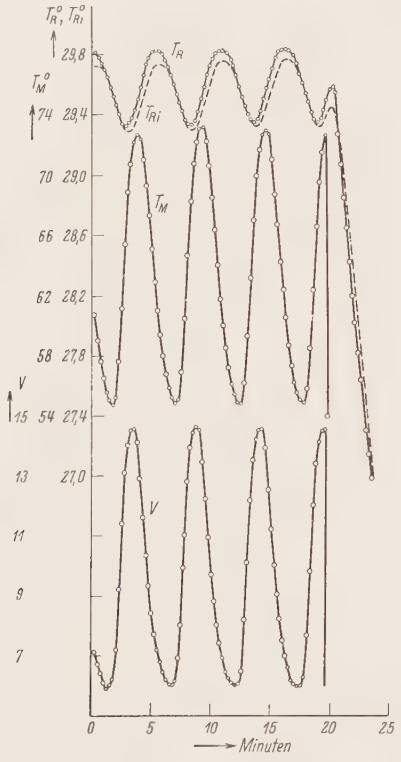

Abb. 2. Zeitlicher Verlauf von Mikrophonwiderstand, Mitten-, Rand- und Ringtemperatur.

Draht befand sich auf der Innenseite des Metallringes, auf dem die Membran liegt (Kurve T_{Ri}), der zweite Draht in der Mitte der Membran zwischen Kohlepulver und Membran (Kurve T_M), der dritte Draht war auf der Außenseite ganz dicht am Rande der Membran angebracht (Kurve T_R). Der zweite Draht befand sich in einem Kapillarrohr.

Die unterste Kurve gibt die Mikrophonschwankungen wieder. Zwischen dieser Kurve und der Kurve T_M ist eine Phasenverschiebung von etwa 20 Sekunden vorhanden. Der Ring, auf dem die Membran aufsitzt, wird im wesentlichen von der Membran erwärmt. Daraus erklärt es sich, daß die Temperatur auf der Membran immer etwas höher ist als auf dem Ringe, und daß die Temperaturschwankung auf dem Ringe (T_{Ri}) der auf der Membran (T_R) etwas nachhinkt. Gegen die Kurve T_M sind die Kurven T_R und T_{Ri} um etwa $1\,^1/_2$ Minuten (100°) phasenverschoben. Nach 19,5 Minuten wurde der Speisestrom des Mikrophons ausgeschaltet. Die Spannung am Mikrophon mußte momentan auf Null zurückgehen. Während bei Kurve T_M die Temperatur auch mit dem Ausschalten gleich absank, stieg sie bei den Kurven T_R und T_{Ri} noch 30 Sekunden lang weiter. Temperaturdifferenzen von 0,01° mußten gemessen werden, um T_R und T_{Ri} einwandfrei wiedergeben zu können.

Zum Schluß möchten wir Herrn Professor Dr. E. Waetzmann für seine wertvollen Ratschläge und für seine Unterstützung bei dieser Arbeit bestens danken. Ferner danken wir dem Mechanikermeister des Instituts, Herrn R. Biernoth, für seine sorgfältige Arbeit beim Bau der erforderlichen Apparate.

(Eingegangen am 27. Januar 1936.)

Sonderdruck aus „Elektrische Nachrichten-Technik", Bd. 13, 1936, H. 6, S. 198—205
(Verlag von Julius Springer in Berlin W 9)

Mathematischer Beitrag zur Erklärung der spontanen Mikrophonschwankungen.

(Mitteilung aus dem Physikalischen Institut der Technischen Hochschule zu Breslau.)

Von **G. Kretschmer**, Breslau.

DK 621. 395. 613. 3. 001

In dieser Zeitschrift ist von E. Waetzmann und G. Kretschmer[1]) eine Erklärung für die Entstehung der von G. Schubert[2]) gefundenen periodischen Widerstandsschwankungen eines von konstantem Gleichstrom durchflossenen Mikrophons gegeben worden[3]). Hiernach sind für das Zustandekommen der Widerstandsschwankungen die Temperaturverhältnisse in der Mitte und am Rande der Mikrophonmembran von maßgebendem Einfluß. Die hier gemessenen Temperaturschwankungen allein würden schon genügen, um eine ausreichende Erklärung für das Auftreten von Widerstandsschwankungen zu geben. Es zeigte sich allerdings, daß noch weitere irreversible Vorgänge im Mikrophon, wie etwa nichtelastische Deformation der Kontaktspitzen des Kohlepulvers unter Druck, oder Veränderung der Gashaut an den Kontaktstellen bei starker Erhitzung, von maßgebendem Einfluß sind. Will man nun den Versuch machen, den Vorgang der Mikrophonschwankungen rechnerisch zu erfassen, so muß man von vornherein darauf verzichten, den Anteil, der sich aus der irreversiblen Veränderung des Kohlepulvers ergibt, mit zu berücksichtigen, da er schwerlich durch einen mathematischen Ausdruck wird wiedergegeben werden können. Er kommt wohl hauptsächlich im aufsteigenden Ast und nur im ersten Teil des absteigenden Astes der Widerstandskurve zur Geltung, so daß für die Halbperiode des absteigenden Astes eine bessere Übereinstimmung zwischen Rechnung und Experiment zu erwarten ist als für die des aufsteigenden Astes.

Für den rechnerischen Ansatz nehmen wir also an, daß der Widerstand des Kohlepulvers während der Schwankungen eindeutig durch die Ausbauchung der Membran gegeben ist, die wiederum lediglich eine Funktion der Temperatur der einzelnen Teile der Membran ist. Hätte die Membran in allen ihren Teilen die gleiche Temperatur, so wäre sie, wenn keine Kräfte auf sie wirkten, vollkommen eben. Im Mikrophon besitzt sie jedoch durch den Druck des Filzringes eine gewisse Ausbauchung nach außen, die noch dadurch vergrößert wird, daß bei stromdurchflossenem Mikrophon die Temperatur vom Rande nach der Mitte zu ständig zunimmt. Werden nun alle Teile der so ausgebauchten Membran um dieselbe Temperaturdifferenz erhöht, so behält sie im großen und ganzen ihre Gestalt bei. Bleibt aber bei der Erwärmung der Rand zunächst auf konstanter Temperatur, so wird sich die Membran — da sich der Rand nicht mit ausdehnt — durch die Erwärmung weiter ausbauchen. Erst die Erhöhung der Randtemperatur um denselben Wert wird der Membran wieder ihre ursprüngliche Gestalt geben, sie also in bezug auf den Zwischenzustand etwas straffen. Erhöht man aber die Temperatur der ausgebauchten Membran nicht in allen Teilen gleichmäßig, sondern vergrößert nur die Temperatur des Randes und die Temperatur der dem Membranmittelpunkt unmittelbar benachbarten Partien um denselben Wert, die Temperatur der zwischenliegenden Membranpartien hingegen um einen bedeutend kleineren Wert, so erscheint es hiernach plausibel, daß jetzt die straffende Wirkung des Randes größer ist als die ausbauchende der übrigen Membran, da diese gegen früher kleiner geworden ist. Oder mit anderen Worten: Um die durch eine bestimmte Temperaturerhöhung

[1]) E. Waetzmann u. G. Kretschmer, ENT **13**, 149, 1936.

[2]) G. Schubert, ENT **4**, 139, 1927.

[3]) So interessant und wichtig für die Klärung der gesamten Wirkungsweise des Mikrophons dieser Effekt auch ist, hat er doch, wie in der Arbeit von Waetzmann und Kretschmer auseinandergesetzt ist, im praktischen Fernsprechbetriebe keine so große Bedeutung wie der von E. Waetzmann gefundene Gleichrichtereffekt. Um so überraschender wirkt es, daß in den meisten zusammenfassenden Abhandlungen über Mikrophone ausführliches Kurvenmaterial nur über die Widerstandsschwankungen und nicht auch über den sehr wichtigen Gleichrichtereffekt angegeben wird.

der Mitte hervorgerufene Vergrößerung der Ausbauchung einer Membran wieder rückgängig zu machen, wird eine geringere Temperaturerhöhung des Randes notwendig sein, wenn die vorgegebene Temperaturerhöhung der Membranmitte sich nur auf die dem Membranmittelpunkt unmittelbar benachbarten Teile beschränkt und die Temperaturerhöhung der zwischen Mitte und Rand gelegenen Membranpartien geringer ist. Dies ist aber bei den periodischen Widerstandsschwankungen der Fall. So zeigte sich z. B. bei einer Messung, bei der die Periode der Widerstandsschwankungen 15 Minuten betrug und die Mittentemperatur um 16° schwankte, daß auf $\frac{2}{5}$ des Membranradius, vom Rande aus gerechnet, die Temperaturschwankungen nur noch den elften Teil des Wertes in der Mitte besaßen.

Diese Betrachtungen sind später für das Verständnis des großen Einflusses der Schwankungen der Randtemperatur wichtig.

Nehmen wir an, daß während der Widerstandsschwankungen die Temperaturschwankungen auf der Membran an allen Stellen mit Ausnahme des Randes gleichphasig verlaufen — diese Voraussetzung ist praktisch nur angenähert erfüllt —, und daß die Temperatur vom Membranrand nach der Mitte zu ständig zunimmt, so können wir die jeweilige Ausbauchung E der Membran bei einer Mittentemperatur T und einer Randtemperatur ϑ durch:

$$E = E'[1 + \bar{\alpha}(T - T') - \bar{\beta}(\vartheta - \vartheta')] \quad (1)$$

ausdrücken, wobei E' die Ausbauchung der Membran bei einer Mittentemperatur T' und einer Randtemperatur ϑ' ist. Machen wir nun noch die Annahme, daß die Widerstandsänderung des Kohlepulvers proportional der Ausbauchungsänderung der Membran ist — diese Annahme wird nach dem früher Gesagten nur für die Halbperiode des absteigenden Astes angenähert zutreffen —, so erhalten wir aus Gl. (1) die Gleichung:

$$R = R'[1 + \alpha(T - T') - \beta(\vartheta - \vartheta')], \quad (2)$$

wobei R' der Widerstand bei den Temperaturen T' und ϑ' ist.

Die Zunahme der Mittentemperatur ΔT in der Zeit Δt ist proportional der Differenz aus der zugeführten Jouleschen Wärme $A' J^2 R \Delta t$ und der von der Mitte wieder abgeleiteten Wärme. Die abgeleitete Wärmemenge wiederum ist proportional der Differenz zwischen Mittentemperatur T und Temperatur der Außenluft T_0. Hierbei entsteht kein großer Fehler dadurch, daß die Wärmemenge teilweise erst durch Teile der Mikrophonkapsel an die Außenluft gelangt. Es ist also:

$$\Delta T = p[A' J^2 R \Delta t - B'(T - T_0)\Delta t] = A J^2 R \Delta t - B(T - T_0)\Delta t. \quad (3)$$

In ähnlicher Weise erhält man eine Beziehung für die Temperaturzunahme $\Delta\vartheta$ des Randes. Die dem Rande zugeführte Wärmemenge setzen wir proportional der zwischen Mitte und Rand herrschenden Temperaturdifferenz. Die abgeleitete Wärmemenge ist wieder proportional der Temperaturdifferenz $\vartheta - T_0$, so daß wir zu der zu Gl. (3) analogen Gl. (4) gelangen:

$$\Delta\vartheta = a(T - \vartheta)\Delta t - b(\vartheta - T_0)\Delta t. \quad (4)$$

Da die Wärme eine gewisse Zeit braucht, um von der Mitte nach dem Rande zu gelangen, müßte man in Gl. (4) T und ϑ eigentlich zu der Zeit $t - h$ nehmen. Man müßte dann z. B. $T_{(t-h)}$ in eine Taylorsche Reihe entwickeln und diese nach dem Gliede $\frac{h^2}{2}\frac{\mathrm{d}^2 T}{\mathrm{d}t^2}$ abbrechen. Es kämen dann in die weitere Berechnung Glieder mit h und h^2, wobei h nach Messungen mit etwa 15 Sekunden anzusetzen wäre. Diese Glieder, die sich zum Teil noch wegheben, sind aber so klein, daß durch sie das Endergebnis nicht beeinflußt wird, so daß wir in Gl. (4) für T und ϑ die Werte zur Zeit t einsetzen können. Die Gl. (3) und (4) entsprechenden Differentialgleichungen lauten dann:

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} = \dot{T} = A J^2 R - B(T - T_0) \quad (5)$$

und entsprechend:

$$\frac{\mathrm{d}\vartheta}{\mathrm{d}t} = \dot{\vartheta} = a(T - \vartheta) - b(\vartheta - T_0). \quad (6)$$

Die Lösung der Gl. (6) lautet:

$$\vartheta = \mathrm{e}^{-(a+b)t}\{C + \int [aT + bT_0]\mathrm{e}^{(a+b)t}\,\mathrm{d}t\}. \quad (7)$$

Gl. (7) und (2) in Gl. (5) eingesetzt ergibt:

$$\dot{T} = A J^2 R'[1 + \alpha(T - T') - \beta\,\mathrm{e}^{-(a+b)t} \{C + \int [aT + bT_0]\mathrm{e}^{(a+b)t}\,\mathrm{d}t\} + \beta\vartheta'] - B(T - T_0). \quad (8)$$

Setzen wir $A J^2 R' = K$ und multiplizieren die Gl. (8) mit $\mathrm{e}^{(a+b)t}$, so erhalten wir:

$$\dot{T}\,\mathrm{e}^{(a+b)t} = K\,\mathrm{e}^{(a+b)t} + K\alpha T\,\mathrm{e}^{(a+b)t} - K\alpha T'\,\mathrm{e}^{(a+b)t} - K\beta C - K\beta\int [aT + bT_0]\mathrm{e}^{(a+b)t}\,\mathrm{d}t + K\beta\,\mathrm{e}^{(a+b)t}\vartheta' - B\,\mathrm{e}^{(a+b)t}T + B\,\mathrm{e}^{(a+b)t}T_0.$$

Diese Gleichung nochmals nach t differentiiert und durch $e^{(a+b)t}$ dividiert ergibt:

$$\ddot{T} + \dot{T}(a+b) = K(a+b) + K\alpha(a+b)\,T + K\alpha\,\dot{T} - K\alpha\,T'(a+b) - K\beta\,[a\,T + b\,T_0] + K\beta(a+b)\,\vartheta' - B\,T(a+b) - B\,\dot{T} + B(a+b)\,T_0.$$

Wir setzen die Summe der konstanten Glieder gleich D und erhalten:

$$\ddot{T} + \dot{T}[a+b-K\alpha+B] + T\{K\alpha\beta + B(a+b) - K\alpha(a+b)\} - D = 0.$$

Wird nun $T - \dfrac{D}{K\alpha\beta + B(a+b) - K\alpha(a+b)} = T$ gesetzt, so gelangen wir zu der Differentialgleichung:

$$\ddot{T} + \dot{T}[a+b-K\alpha+B] + T\{K\alpha\beta + B(a+b) - K\alpha(a+b)\} = 0. \qquad (9)$$

Der Lösungsansatz lautet: $T = c\,e^{\varphi t}$. Daraus ergibt sich:

$$\varphi = -\frac{a+b-K\alpha+B}{2} \pm \sqrt{\frac{[a+b-K\alpha+B]^2 - 4\{K\alpha\beta + B(a+b) - K\alpha(a+b)\}}{4}}$$

Für die Frequenz der Schwingungen maßgebend ist nur der Wert z des Radikanden, der negativ sein muß. Für die Kreisfrequenz ω der Schwingung besteht dann die Beziehung $\omega^2 = -z$.

$$\omega^2 = -z = \frac{1}{4}[2(a+b)\cdot B + 2K\alpha B + 4K\alpha\beta - (a+b)^2 - K^2\alpha^2 - B^2 - 2(a+b)K\alpha]. \qquad (10)$$

Zur Berechnung der Konstanten a, b, B, K, α und β benutzen wir die Meßergebnisse der Abb. 1, die den Verlauf der Temperaturwerte am Rande und in der Mitte der Membran und die Änderung der an dem Mikrophon liegenden Spannung angeben. Die Werte der Spannungskurve sind bei konstantem Speisestrom bis auf einen Proportionalitätsfaktor direkt mit den veränderlichen Widerstandswerten identisch ($E = JR$). Die Temperatur wurde in der früher beschriebenen Weise[4]) gemessen. Die Wollastondrähte lagen, nur durch eine dünne Isolierschicht von der Membran getrennt, direkt auf dieser auf. Der Widerstand des Wollastondrahtes in der Membranmitte betrug etwa 47 Ω, und es floß ein Strom von 5 mA hindurch. Die entsprechenden Daten des Drahtes am Rande sind: 42 Ω und 9,8 mA. Die Spannungs- und Temperaturwerte wurden alle 15 Sekunden abgelesen; dort, wo in der Zeichnung Meßpunkte zu dicht zusammenfielen, sind sie nur von 30 zu 30 Sekunden angegeben. Bei der Temperatur am

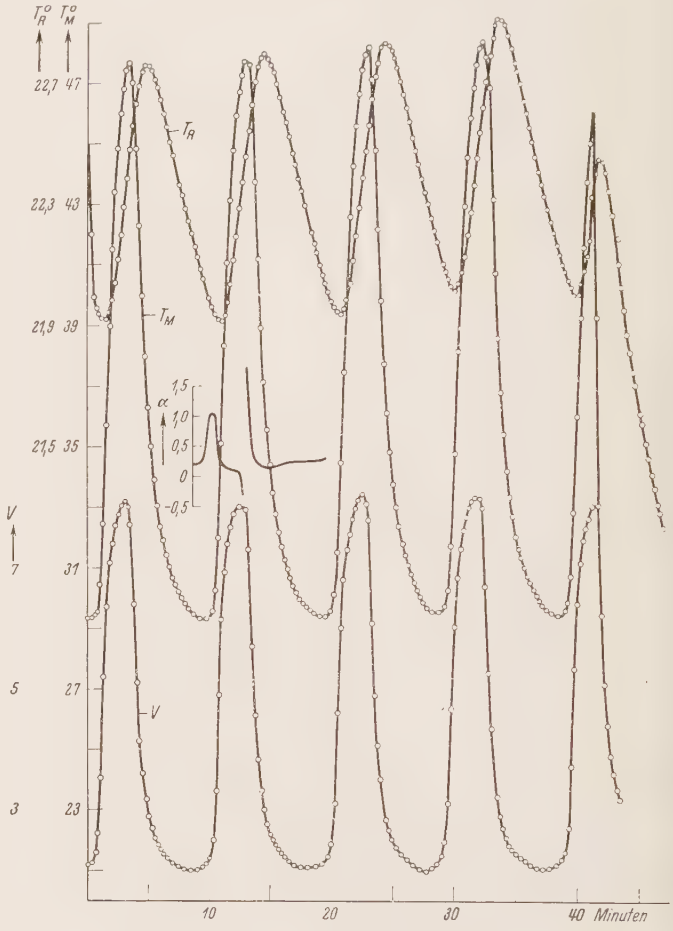

Abb. 1. Periodische Schwankungen des Mikrophonwiderstandes und der Temperaturen am Rande und in der Mitte der Membran.

Rande konnten Veränderungen von 0,005°, bei der Temperatur in der Mitte Veränderungen von 0,03° und bei der Spannung Veränderungen von 0,01 Volt noch beobachtet werden. Die Meßgenauigkeit ist etwa das Dreifache dieser Werte. Das Voltmeter lag in Reihe mit einem Widerstande und einem zweiten schreibenden Voltmeter mit einem Widerstand von 1250 Ω, so daß der Nebenschluß der Spannungsmeßinstrumente einen Widerstand von etwa 5000 Ω besaß. Die Batteriespannung betrug 220 Volt, der Speisestrom I des Mikrophons, der durch vorgeschaltete

[4]) G. Kretschmer u. A. Ueberschuß, ENT **13**, S. 162, 1936.

Widerstände annähernd konstant gehalten wurde, schwankte durch die Änderung des Mikrophonwiderstandes zwischen 44 und 46,5 mA. Die Temperatur der Außenluft betrug während der Messung $T_0 = 20{,}2°$. Das benutzte Mikrophon war eine ZB-Type (Rotkreuz) von Mix & Genest mit glatter Membran.

Nach 41,25 Minuten wurde abgeschaltet ($J = 0$). Aus Gl. (3) ergibt sich dann: $\Delta T = -B(T - T_0)\Delta t$. Setzt man die Temperaturwerte, die sich nach dem Abschalten aus der Kurve ergeben, in diese Gleichung ein ($\Delta t = 15$ sec), so erhält man für B den Wert 0,025. Für die Berechnung dürfen allerdings nur die Temperaturwerte bis $^3/_4$ Minuten nach dem Abschalten benutzt werden, da die späteren Temperaturwerte der Membranmitte schon sehr nahe bei der Temperatur der übrigen Mikrophonkapsel liegen, die eine gewisse Wärmekapazität besitzt, so daß die Rechnung eine zu kleine Wärmeableitung von der Membranmitte ergeben würde.

In ähnlicher Weise kann man den Wert für b nach Gl. (4) berechnen. Ist nach dem Abschalten die Mittentemperatur so weit abgesunken, daß die von der Mitte nach dem Rande zu transportierte Wärmemenge vernachlässigt werden kann, so ist: $\Delta\vartheta = -b(\vartheta - T_0)\Delta t$. Setzt man die entsprechenden Temperaturwerte in diese Gleichung ein, so ergibt sich im Mittel: $b = 0{,}0029$. (Die berechneten Werte weichen von dem Mittelwert bis zu $\pm 5\%$ ab.) Unter Zugrundelegung des Wertes für b kann der Wert für a nach Gl. (4) berechnet werden, indem man die entsprechenden Temperaturwerte zu irgendwelchen Zeiten vor dem Abschalten in die Gleichung einsetzt. Für a ergibt sich dann als mittlerer Wert: $a = 0{,}00051$ (Fehler bis $\pm 10\%$).

Eine Beziehung für das Verhältnis von β zu α erhalten wir, wenn wir Gl. (2) auf zwei benachbarte R-Werte (R_1 und R_2), die die gleiche Größe besitzen (Minimum der Widerstandskurve), anwenden. Es ist dann:

$$R_2 - R_1 = 0 = \alpha(T_2 - T_1) - \beta(\vartheta_2 - \vartheta_1);$$

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{T_2 - T_1}{\vartheta_2 - \vartheta_1} = \frac{\Delta T}{\Delta \vartheta} \qquad (\Delta t = 15 \text{ sec}).$$

Aus den entsprechenden Werten der Minima der R-Kurve, d. h. also der Stellen, wo die straffende Wirkung der Abkühlung der Membranmitte gerade noch der ausbauchenden Wirkung der Abkühlung des Membranrandes das Gleichgewicht hält, ergibt sich: $\frac{\beta}{\alpha} = 3{,}8$ (Fehler bis $\pm 15\%$). Das Maximum der Widerstandskurve kann für die Berechnung von $\frac{\beta}{\alpha}$ nicht herangezogen werden, weil nach den früheren Ausführungen dort noch andere Einflüsse für die Umkehr der Widerstandskurve maßgebend sind. Man würde dort für das Verhältnis aus Gl. (2) den Wert $\frac{\beta}{\alpha} = 7$ erhalten. Der Wert $\frac{\beta}{\alpha} = 3{,}8$ gilt nach den früheren Erörterungen für alle Punkte der Widerstandskurve.

Den Wert für α können wir nun nach Gl. (2) berechnen. Für irgend zwei benachbarte Widerstandswerte R_1 und R_2 gilt die Beziehung:

$$R_2 - R_1 = R'[\alpha(T_2 - T_1) - \beta(\vartheta_2 - \vartheta_1)]. \quad (11)$$

Da es bei der Berechnung von α nicht auf die Absolutwerte der Widerstände ankommt, setzen wir R_1 und R_2 zahlenmäßig gleich den zugehörigen Spannungswerten, die direkt aus der entsprechenden Kurve in Abb. 1 entnommen werden können. R', über das wir nach Gl. (2) frei verfügen können, setzen wir gleich 1, so daß Gl. (11) übergeht in die Gl.:

$$R_2 - R_1 = \alpha(T_2 - T_1) - \beta(\vartheta_2 - \vartheta_1).$$

Nehmen wir als Zeitdifferenz zwischen den Stellen 1 und 2 wie immer die Zeit zwischen zwei Ablesungen (15 sec), so können wir aus obiger Gleichung für jedes Kurvenstück zwischen zwei Ablesungen den Wert für α berechnen. Der Verlauf der α-Werte ist in Abb. 1 für eine Schwingung eingetragen. Es zeigt sich, daß sich die α-Werte im ansteigenden Ast — wohl hauptsächlich durch die erwähnten irreversiblen Veränderungen des Kohlepulvers — stark ändern. Diese sind aber in der Rechnung nicht berücksichtigt. Eine besonders starke Verfälschung der α-Werte zeigt sich im Maximum der Widerstandskurve, da hier zu einer verhältnismäßig geringen Änderung der Membranausbauchung durch andere Effekte eine verhältnismäßig starke Widerstandsänderung gehört. Aber schon $^3/_4$ Minuten nach dem Maximum der Mittentemperaturkurve erreicht die α-Kurve einen Wert, den sie im großen und ganzen bis zum Wideranstieg der Mittentemperatur nach dem Minimum beibehält. Unsere Berechnungen gelten also hauptsächlich für die Halbperiode des absteigenden Astes. α hat hier mit Ausnahme der

ersten 45 Sekunden nach dem Maximum den mittleren Wert $\alpha = 0{,}23$ (Fehler bis $\pm 30\%$).

Als letztes bleibt noch die Bestimmung der Konstanten $K = A J^2 R'$. Hierfür berechnen wir zunächst nach Gl. (3) den Wert von $A J^2 R$ zu einer beliebigen Zeit t ($\Delta t = 15$ sec). Um nun $K = A J^2 R'$ zu erhalten, müssen wir den berechneten Wert von $A J^2 R$ durch das entsprechende R dividieren. Den Wert von R entnehmen wir wieder aus der Spannungskurve und setzen ihn auch wie früher zahlenmäßig gleich dem Spannungswert, den die Spannungskurve zur Zeit t besitzt. Für K ergibt sich als Mittelwert $K = 0{,}1$ (Fehler bis $\pm 12\%$).

Setzen wir die so berechneten Werte von B, a, b, α, β, K in die Gl. (10) ein, so ergibt sich $\omega^2 = 0{,}0000439$; die Schwingungsdauer ist dann: $\tau = 948$ sec $= 15\,^4/_5$ Minuten. Für die Halbperiode des absteigenden Astes ergibt also die Rechnung $7\,^9/_{10}$ Minuten, während sie nach der Messung (Abb. 1) 6 Minuten beträgt. Der Fehler beträgt also etwa 30%. Er rührt daher, daß im ersten Teil der Halbperiode des absteigenden Astes, also kurz nach dem Maximum, noch andere Effekte, die in der Rechnung nicht berücksichtigt sind, zur Widerstandsverminderung beitragen (s. die Kurve der α-Werte). Ihre Einwirkung auf die Widerstandsänderung wird aber gegen das Minimum zu immer geringer, und das Wiederansteigen des Widerstandes wird, wie in der Arbeit von E. Waetzmann und G. Kretschmer[5]) eingehend auseinandergesetzt wurde, lediglich durch die Wirkung des sich abkühlenden Membranrandes ausgelöst.

Durch Abänderung der Versuchsbedingungen können wir nun die in der Gleichung für die Schwingungsdauer enthaltenen Konstanten variieren und ihren Einfluß auf die Schwingungsdauer rechnerisch und experimentell prüfen. Eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch wird dann mit als ein Beweis für die Richtigkeit der der Rechnung zugrunde liegenden Anschauung gewertet werden können.

Die Speisestromstärke bei der Aufnahme der Kurven in Abb. 1 betrug $J = 45$ mA. Führt man die letzte Berechnung der Schwingungsdauer für

$$J_1 = \frac{2}{3} J \left(K_1 = \frac{4}{9} K\right) \quad \text{und} \quad J_2 = \frac{3}{4} J \left(K_2 = \frac{9}{16} K\right)$$

durch, so sieht man, daß für J_1 ω^2 schon negativ wird, während für J_2 ω^2 noch positiv ist; d. h. die Rechnung ergibt, daß die Schwingungen bei etwa 30 mA aufhören müssen. Versuche ergaben, daß dies bei einer Speisestromstärke von 23 mA der Fall war.

Weiterhin kann man rechnerisch und experimentell die Abhängigkeit der Schwingungsdauer von K, B, a, b untersuchen. Hierfür sei vorweg festgestellt: wenn ω^2 größer wird, wird die Schwingungsdauer kleiner.

Um die Abhängigkeit der Frequenz von K festzustellen, bilden wir den Differentialquotienten:

$$\frac{\mathrm{d}\,\omega^2}{\mathrm{d}\,K} = \frac{\alpha B}{2} + \alpha\beta - \frac{K\alpha^2}{2} - \frac{\alpha(a+b)}{2}.$$

Als mittleren Wert von α für die ganze Periode wollen wir 0,35 annehmen; $\beta = 3{,}8 \cdot \alpha$ wird dann gleich 1,33. Dann ergibt sich:

$$\frac{\mathrm{d}\,\omega^2}{\mathrm{d}\,K} = 0{,}0044 + 0{,}0007 - K \cdot 0{,}062 - 0{,}0006, \quad (12)$$

d. h. $\frac{\mathrm{d}\,\omega^2}{\mathrm{d}\,K}$ ist bis $K = 0{,}0725$ positiv und für größere Werte negativ. Umgerechnet auf J (für $K = 0{,}1$ war $J = 45$ mA) liefert dies folgendes Resultat: von $J = 23$ bis 38 mA wird die Schwingungsdauer kürzer, um dann wieder länger zu werden.

Die oberste Kurve von Abb. 2 zeigt die aus dem Versuch sich ergebende Abhängigkeit der Schwingungsdauer von dem Speisestrom. Der Umkehrpunkt liegt schon bei 32 mA. Eine gegeringe Vergrößerung des angenommenen Wertes von α würde aber den rechnerischen Wert für die Speisestromstärke, bei der die Schwingungsdauer den kleinsten Wert hat, näher an 32 mA

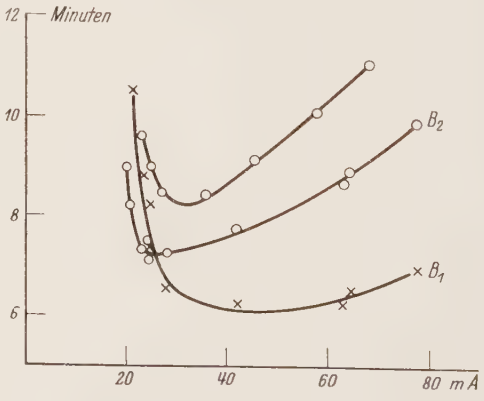

Abb. 2. Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Speisestromstärke und der Wärmeableitung in der Mitte der Membran.

[5]) a. a. O. S. 154.

heranrücken. Mag auch im einzelnen der Wert von a für eine ganze Schwingung etwas zu groß oder zu klein angenommen sein, so bleibt doch die grundsätzliche Übereinstimmung des allgemeinen Verlaufes der durch die Rechnung und durch das Experiment erhaltenen Kurven bestehen.

Für die Abhängigkeit der Frequenz von B erhält man:

$$\frac{d\omega^2}{dB} = \frac{a+b}{2} + \frac{K a}{2} - \frac{B}{2} \qquad (13)$$

$$= 0{,}0017 + K \cdot 0{,}175 - \frac{B}{2}.$$

Die Änderung von B wurde dadurch erreicht, daß der Mitte der Membran einmal die Stirnfläche eines Messingzylinders von 2 cm Durchmesser bis auf ganz geringen Abstand genähert wurde (B_1), das andere Mal eine runde Filzplatte von demselben Durchmesser an die Membranmitte dicht — natürlich ohne Berührung — herangebracht wurde (B_2). Hierbei wurden die Schwingungen fast gar nicht gestört. Aus experimentellen Gründen mußte ein anderes Mikrophon als das, bei dem die Temperaturmessungen vorgenommen worden waren, verwendet werden. Trotzdem können wir annehmen, daß die Konstanten a, B, α, K größenordnungsmäßig denselben Wert haben wie bei dem früher benutzten Mikrophon. Zu dieser Annahme sind wir durch gleiche Messungen und Berechnungen bei anderen Mikrophonen berechtigt. Unter dieser Annahme zeigt die Gl. (13), daß für kleine K, z. B. $K = 0{,}1 \cdot \frac{9}{16}$, $\frac{d\omega^2}{dB}$ negativ ist ($B = 0{,}025$), für große K, z. B. $K = 0{,}1$, $\frac{d\omega^2}{dB}$ positiv ist; d. h. bei besserer Wärmeableitung in der Mitte der Membran werden die Schwingungen für kleines J länger, für großes J kürzer. Die Richtung der Frequenzänderung bei Vergrößerung von B kehrt sich also bei einer Stromstärke J' um.

Um diese Stromstärke J' zu berechnen, müssen wir die Gleichungen für ω^2 für die beiden verschiedenen Wärmeableitungen B_1 und B_2 einander gleichsetzen. Wir erhalten dann

$$B_1^2 - 2K'\alpha B_1 - 2B_1(a+b) = B_2^2 - 2\alpha K' B_2 - 2B_2(a+b);\quad B_1 + B_2 - 2(a+b) = 2K'\alpha$$

$$K' = \frac{B_1 + B_2 - 2(a+b)}{2\alpha}.$$

Die Membran des Mikrophons, mit dessen Hilfe wir den Wert von B berechnet haben, besaß in der Mitte für die Befestigung des Temperaturmeßdrahtes eine kleine Kittauflage, die wärmeisolierend wirkt. Wir wollen daher B_1 mit 0,3 etwas größer als das berechnete B ansetzen. Weiter wollen wir für die Rechnung noch annehmen, daß durch die Filzplatte $B_2 = \frac{2}{3} B_1$ wurde. Unter all diesen Annahmen erhält man rechnerisch für K' den Wert:

$K' = \frac{0{,}05 - 0{,}00682}{0{,}7} \approx 0{,}06$; daraus ergibt sich

$$J' = 45\sqrt{\frac{K'}{K}} = 45 \cdot \sqrt{0{,}6} \approx 35 \text{ mA}.$$

Die experimentell gefundene Abhängigkeit der Schwingungsdauer von B und J zeigen die beiden unteren Kurven auf Abb. 2. Der Schnittpunkt der Kurven liegt hier bei 27 mA.

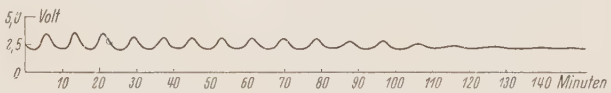

Abb. 3. Allmähliches Aufhören der Widerstandsschwankungen durch Vergrößerung der Wärmeableitung in der Membranmitte bei geringer Speisestromstärke.

Bei $J_0 = 20{,}5$ mA treten, wenn die Filzplatte der Membran gegenübersteht, gerade noch Schwingungen auf, d. h. ω^2 ist bei dieser Speisestromstärke gerade noch positiv. Da für $J = 45$ mA $K = 0{,}1$ war, entspräche diesem J_0 etwa $K_0 = 0{,}1 \cdot \frac{1}{4}$. $\frac{d\omega^2}{dB}$ ist für $K_0 = 0{,}1\,\frac{1}{4}$ und $B = 0{,}2$ negativ; d. h. eine Vergrößerung von B vergrößert auch den Wert von ω^2, kann also an dieser Stelle bewirken, daß $\omega^2 < 0$ wird und damit die Schwingungen aufhören. Abb. 3 zeigt zuerst die Widerstandsschwankungen bei der Stromstärke von 20,5 mA und kleiner Wärmeableitung (B_2). An der mit dem Kreis bezeichneten Stelle wurde die Filzplatte entfernt und dafür der Messingzylinder der Membran genähert (B_1). Die Schwingungen werden immer kleiner und hören schließlich ganz auf. Oft hörten bei dieser Vergrößerung von B die Schwingungen auch ohne diesen allmählichen Übergang auf, um bei Verkleinerungen von B wieder einzusetzen.

Aus Gl. (12) ergibt sich auch in Übereinstimmung mit den beiden unteren Kurven der Abb. 2,

daß die Stromstärke, bei der die Schwingungsdauer den kleinsten Wert besitzt $\left(\frac{d\omega^2}{dK} = 0\right)$, um so kleiner wird, je kleiner B wird. Erwähnen möchte ich noch, daß alle Kurven der Abb. 2 von Mikrophonen stammen, an denen gewisse Veränderungen vorgenommen worden sind.

Die Abhängigkeit der Frequenz von a erhalten wir durch die Beziehung:

$$\frac{d\omega^2}{da} = \frac{B}{2} + K\beta - \frac{a+b}{2} - \frac{Ka}{2}$$

$$0{,}0125 - 0{,}133 - \frac{a + 0{,}0029}{2} - 0{,}0175.$$

Wird a kleiner, so wird die Schwingungsdauer größer. Die Verkleinerung von a erreicht man

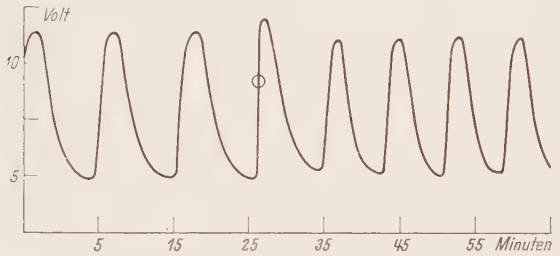

Abb. 4. Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Wärmekapazität des Randes.

Wird b stark vergrößert, so wird auch die Schwingungsdauer größer. Die Vergrößerung von b wurde dadurch erreicht, daß Wasser durch den oben erwähnten Ring hindurchströmte. Je schneller das Wasser fließt, desto besser ist die Kühlung, und bei starker Vergrößerung von b müßten sogar, wie aus der Formel für ω^2 ersichtlich, die Schwingungen aufhören. Allerdings kann die Wärmeableitung vom Membranrand vermittels des Ringes eine gewisse Größe nicht überschreiten. Außerdem sind bei schneller fließendem Wasser auch durch das Fließen die Störungen so groß, daß die Schwingungen durch diese Unregelmäßigkeiten wieder angestoßen werden. Macht man, um die Störungen zu vermeiden, die Strömung des Wassers sehr gering, so wird auch die Wärmeableitung und mithin b wieder kleiner. Versuche,

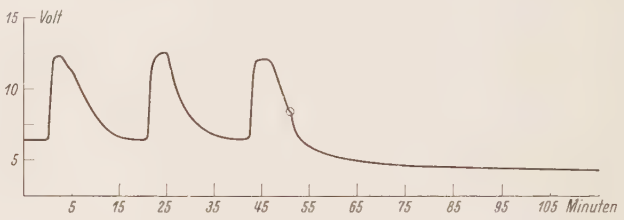

Abb. 5. Abhängigkeit der Schwingungsdauer von der Größe der Wärmeableitung am Membranrand.

auf folgende Weise: man macht den Auflagering der Membran zur Außenwand eines Hohlringes, der sich in der Mikrophonkapsel befindet und in welchen Wasser gefüllt werden kann. Auf diese Weise ergibt eine nach dem Rande gelangende Wärmemenge eine geringere Temperaturerhöhung des Randes als vor der Veränderung. a kann also hiermit verkleinert werden, ohne daß die anderen Konstanten ihren Wert ändern. Abb. 4 zeigt die Widerstandsschwankungen zunächst bei gefülltem (kleines a), dann bei leerem (großes a) Wasserring. An der mit einem Kreis bezeichneten Stelle wurde der Wasserkasten entleert. Die sonstigen Versuchsbedingungen waren dieselben. Man erkennt hier deutlich die Vergrößerung der Schwingungsdauer bei gefülltem Wasserbehälter.

Schließlich ist noch die Abhängigkeit der Frequenz von b zu untersuchen.

$$\frac{d\omega^2}{db} = \frac{B}{2} - \frac{a+b}{2} - \frac{Ka}{2}$$

$$= 0{,}0125 - \frac{0{,}00051 + b}{2} - K \cdot 0{,}175.$$

den Membranrand direkt dadurch zu kühlen, daß das Wasser durch einen Hohlzylinder geleitet wurde, in den der Membranrand hineinragte, ergaben auch bei ganz langsamem Fließen derartig große Störungen, daß Widerstandsänderungen allein hierdurch dauernd auftraten. Die Versuche konnten daher nur mit der vorher beschriebenen Kühlvorrichtung durchgeführt werden.

Der erste Teil der Kurve in Abb. 5 zeigt bei langsamem Fließen des Wassers (also großem b) in Übereinstimmung mit der Rechnung die gegenüber der Kurve in Abb. 4 stark vergrößerte Schwingungsdauer. Manchmal hörten auch, wie andere Kurvenaufnahmen zeigen, die Schwingungen für lange Zeit ganz auf, und der konstante Widerstand wurde nur hin und wieder durch eine Schwankung unterbrochen. Die Kurven der Abb. 4 und 5 sind an demselben Mikrophon bei gleicher Stromstärke ($J \approx 43$ mA) aufgenommen und öfters reproduziert worden, ohne daß an dem Mikrophon eine Veränderung vorgenommen wurde. Interessant ist noch bei der Kurve der Abb. 5 der Verlauf nach der mit dem Kreis bezeichneten

Stelle, an der das Kühlwasser abgestellt wurde. Da der Ring und das Wasser zur Erwärmung, die im ganzen vielleicht 5° betrug, längere Zeit benötigten, hörten die Schwingungen ganz auf.

Die Berechnung der Schwingungsdauer der Widerstandsschwankungen wurde — wie schon früher angedeutet — an Hand von ähnlichen Kurvenaufnahmen auch für andere Mikrophone durchgeführt. Bei ihnen ergab die berechnete Schwingungsdauer ebenfalls einen Fehler bis zu 30% in demselben Sinne wie bei unserem Beispiel.

Zusammenfassung.

Es wurde versucht, die in der Arbeit von E. Waetzmann und G. Kretschmer entwickelte Anschauung über das Zustandekommen der periodischen Mikrophonschwankungen mathematisch zu erfassen, wobei aber nur der Einfluß, den die Temperaturverhältnisse der Membran auf die Schwingungen haben, rechnerisch erfaßt werden konnte. Daher gelten die Berechnungen hauptsächlich nur für die Halbperiode des absteigenden Astes. Bei der Änderung verschiedener, die Schwingungsdauer bestimmenden Größen erhält man rechnerisch und experimentell im großen und ganzen dieselben, manchmal sehr eigenartigen (z. B. Abb. 2) Ergebnisse bezüglich der Schwingungsdauer.

Zum Schluß möchte ich auch an dieser Stelle Herrn Professor Dr. Waetzmann für sein reges und förderndes Interesse herzlich danken.

(Eingegangen am 30. März 1936.)

Lebenslauf.

Am 20. 4. 1907 wurde ich, Gerhard Kretschmer, in Breslau als Sohn des Volksschulrektors Wilhelm Kretschmer geboren. Ostern 1926 bestand ich am Realgymnasium am Zwinger in Breslau die Reifeprüfung. Von Ostern 1926 bis Ostern 1931 studierte ich an der Technischen Hochschule in Breslau Mathematik und Physik. Im September und Oktober 1931 war ich in den Oderwerken in Stettin als Praktikant tätig. Weihnachten 1930 bestand ich die Diplomhauptprüfung, Juli 1931 die wissenschaftliche, September 1933 die pädagogische Prüfung für das Lehramt an höheren Schulen und wurde am 1. Oktober 1933 zum Studienassessor ernannt. Von Ostern 1930 bis Ostern 1936 war ich am Lehrstuhl für Geometrie als außerplanmäßiger Assistent bei Prof. Dr. Happel tätig. Ihm schulde ich für die Förderung, die er mir nicht nur auf wissenschaftlichem Gebiet angedeihen ließ, großen Dank. Seit Oktober 1933 war ich am Physikalischen Institut der Technischen Hochschule Breslau mit der Anfertigung vorstehender Arbeit beschäftigt und bin dem Institutsdirektor, Herrn Professor Dr. Waetzmann, meinem hochverehrten Lehrer, für die Aufgabenstellung, sein unermüdliches Interesse und seine tatkräftige Hilfe zu großem Dank verpflichtet.